



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

NIKO TISSARI
ÖLJYN KÄYTÖN VÄHENTÄMINEN KAUKOLÄMMÖN
TUOTANNOSSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
4. marraskuuta 2015

TIIVISTELMÄ

NIKO TISSARI: Öljyn käytön vähentäminen kaukolämmön tuotannossa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 93 sivua, 2 liitesivua

Joulukuu 2015

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: kaukolämpö, öljy, investointilaskelma

Tässä työssä etsittiin liiketaloudellisesti kannattavia toimenpiteitä, joilla voidaan vähentää öljyn käyttöä Savon Voima Oyj:n kaukolämmön tuotannossa. Polttoöljyjä käytetään nykyään Savon Voimalla ainoastaan huippu- ja varatehon tuotantoon. Tätä työtä kirjoittaessa kesällä ja syksyllä 2015 öljyn hinta on varsin alhaalla, minkä vuoksi polttoöljyjen kannattavuus nykyisessä käytössä on varsin hyvä ja korvausinvestointien mahdollisuudet siten erittäin rajalliset. Tämän vuoksi työssä tutkittiin myös toimenpiteitä, joiden avulla öljyn käyttöä on mahdollista vähentää myös hyödyntämällä nykyistä laitekantaa tehokkaammin. Työssä keskityttiin kaukolämmön tuotantoon ja jätettiin menetelmät, kuten kysyntäjousto työn ulkopuolelle.

Työssä esitellään Savon Voiman käytettävissä olevia teknisiä ratkaisuita, joilla öljyn käyttöä olisi mahdollista vähentää. Näistä valittiin potentiaalisimmat ja niille toteutettiin kannattavuuslaskelmat kolmelle erikokoiselle kaukolämpöverkolle. Esimerkkikaukolämpöverkkojen tehontarpeet mallinnettiin vuosille 2011 – 2014 ulkolämpötilatilaston ja verkkojen säätökäyrien perusteella. Tämän jälkeen öljyn käyttöä korvaavat tuotantolaitokset mallinnettiin olemassa olevien tuotantolaitosten rinnalle ottaen huomioon optimaalinen ajojärjestys, realistiset käytettävyydet ja minimitehot.

Tuotantolaitosinvestoinneista kannattavaksi nykyisillä polttoaineiden hinnoilla saatiin työn perusteella ainoastaan lämpöä talteen ottava savukaasupesuri Kiuruveden kaukolämpöverkkoon. Muille tuotantotavoille laskettiin korvattavalle polttoöljylle rajahinta, jonka ylittyessä investoinnit pääsevät pääoman tuottotavoitteeseen. Käytön tehostamistoimenpiteitä, joilla öljyn käyttöä voidaan vähentää, löydettiin useampia. Esimerkiksi polttoaineen syöttäminen vaihtoehtoisella tavalla kiinteän polttoaineen lämpökeskukselle lisämessä polttoaineen vastaanoton revision aikana tarjoaa melko huomattavan potentiaalin öljyn käytön vähentämiseen. Myös reduktioajoa tulisi hyödyntää nykyistä useammin talven kireillä pakkasilla, kun sähkön Spot-hinta on alhainen.

ABSTRACT

NIKO TISSARI: Reducing the use of oil in district heat production

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 93 pages, 2 Appendix pages

December 2015

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering

Major: Power Plants and Combustion Technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: district heating, oil, investment calculation

This thesis studies the economically viable ways of reducing the use of oil in the production of district heating in the heating networks of Savon Voima PLC. In Savon Voima, fuel oils are these days used only for peak and backup heat generation. The price of oil in the summer of 2015 is significantly lower than the average of the past decade. Because of this, the cost-effectiveness of fuel oils in the production of peak and backup heat is relatively high and the number of economically viable alternatives is few. For this reason, this thesis also studies the ways of improving the use of current production plants to reduce the use of oil. This thesis focuses in the production of district heating and the methods like demand side management are left out.

This thesis introduces some technological solutions that could replace the oil boilers as peak and backup heat generating plants. The most promising solutions were chosen for more precise analysis on three different size district heating networks. The heat demands of the three networks were modeled based on the outdoor temperature statistics and the regulation curves of the networks for the years 2011 – 2014. After this, the chosen plants were modeled to be running instead of the oil boilers when needed, taking in account realistic availabilities and minimum loads.

The only profitable investment in production plants according to the models with current fuel prices was heat recovery scrubber for the heating network of Kiuruvesi. Profitable price limit of fuel oils was calculated for other investment possibilities. Improving the use of current producing plants offers more applicable methods for oil use reduction already on current fuel prices. Methods like alternative way of fuel feeding during the maintenance of fuel reception offer quite significant potential for oil usage reduction. The use of turbine bypass valve for increased heat production should be utilized more during peak heat demand on the hours of low electricity price.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Savon Voimalle kesän ja syksyn aikana vuonna 2015. Työn ohjaajana toimi Maija Henell. Opin työtä tehdessäni paljon ja työn tekeminen oli antoisaa. Haluan kiittää kaikkia työn tekemisessä auttaneita Savon Voimalaisia loistavasta työilmapiiristä ja vastauksista lukuisiin kysymyksiini. Kiitoksia myös professori Risto Raikolle työn tarkastajana toimimisesta ja energiatekniikan opetuksesta ennen sitä.

Opiskelutovereilleni en voi muuta sanoa kuin hattua nostaa. Kiitokset mahtavista opiskelumuistoista!

Kiitän myös tyttöystävääni Annaa kannustuksesta ja siitä, että olet auttanut myös välillä unohtamaan tämän projektin.

Toivalassa, 16.11.2015

Niko Tissari

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Savon Voima Oyj	2
1.2	Lämpöliiketoiminta	3
1.3	Bioenergiaohjelma	4
2.	LÄMMÖN TUOTANTO.....	7
2.1	Peruskuormalaitokset	9
2.1.1	Savon voiman käytössä olevat kattilatyypit.....	9
2.1.2	Peruskuormalaitosten mitoitus	10
2.2	Keskikuormalaitokset.....	12
2.3	Huippu- ja varateholaitokset	13
2.4	Polttoaineiden hinnat.....	14
3.	KÄYTETTÄVYYSANALYYSIT.....	18
3.1	Pyrolyysiöljy	18
3.1.1	Pyrolyysiöljyn ominaisuudet.....	18
3.1.2	Pyrolyysiöljyn vaatimukset laitteistolle	20
3.1.3	Pyrolyysiöljyn ominaisuudet poltettaessa.....	21
3.1.4	Kokemuksia pyrolyysiöljyn koepoltoista.....	22
3.2	Pellettipolttimet	23
3.3	Lämpöpumput	25
3.3.1	Lämpöpumpun kannattavuuteen vaikuttavat tekijät	27
3.4	LTO -savukaasupesuri.....	28
3.5	Aurinkolämpö.....	31
3.5.1	Aurinkolämmön keräintekniikat	32
3.5.2	Aurinkolämpö kaukolämpöjärjestelmässä	34
3.6	Lämpöakku.....	36
3.7	Sähkökattilat.....	41
4.	TARKASTELUUN VALITUT KAUKOLÄMPÖVERKOT.....	43
4.1	Iisalmi.....	43
4.2	Kiuruvesi	45
4.3	Rautalampi	46
5.	KANNATTAVUUSLASKELMAT	48
5.1	Investointilaskentamenetelmät	48
5.2	Kaukolämpöverkkojen tehontarpeen mallinnus.....	49
5.3	Lämpöakku.....	50
5.4	Pyrolyysiöljy	52
5.4.1	Pyrolyysiöljylämpökeskuksen kannattavuus Rautalammilla.....	53
5.4.2	Pyrolyysiöljylämpökeskuksen kannattavuus Kiuruvedellä	54
5.5	Pellettikattilat	55
5.5.1	Pellettilämpökeskusten kannattavuus Rautalammilla.....	58

5.5.2	Pellettilämpökeskusten kannattavuus Kiuruvedellä.....	59
5.5.3	Pellettilämpökeskusten kannattavuus Iisalmessa.....	62
5.6	LTO-savukaasupesuri.....	63
5.6.1	LTO-savukaasupesurin kannattavuus Rautalammillä.....	63
5.6.2	LTO-savukaasupesurin kannattavuus Kiuruvedellä	64
5.7	Lämpöpumput	67
5.8	Sähkökattilat.....	68
5.9	Yhteenveto kannattavuuksista.....	69
5.9.1	Rautalammin yhteenveto.....	70
5.9.2	Kiuruveden yhteenveto	71
5.9.3	Iisalmen yhteenveto	72
6.	MUUT KEHITYSEHDOTUKSET	73
6.1	Polttoaineen priimaus.....	73
6.1.1	Priimauksen tarjoamat hyödyt	74
6.1.2	Kiinteän polttoaineen varastointi	75
6.1.3	Toiminnan kehittäminen yhdessä polttoainetoimittajien kanssa ...	77
6.2	Kunnossapidon tehostaminen.....	78
6.3	Verkon lataaminen	79
6.4	Laitosten ajaminen yliteholla	80
6.5	Reduktioventtiilin hyödyntäminen.....	81
6.6	Latvapistemittaukset.....	82
6.7	Polttoaineen syöttö pyöräkuormaajalla Iisalmessa vastaanoton kesärevision aikana.....	84
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	86
8.	LÄHDELUETTELO.....	89

LIITE A: Savukaasupesurin simulointi Rautalammillle

LIITE B: Savukaasupesurin simulointi Kiuruvedelle

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Lämmön ja sähkön yhteistuotanto (eng. combined heat and power)
COP	Lämpöpumpun lämpökerroin (eng. coefficient of performance)
EHPA	Euroopan lämpöpumppuyhdistys (eng. European heat pump association)
KPA	Kiinteä polttoaine. Tässä työssä turve ja puuperäiset polttoaineet
LTO	Lämmön talteenotto
MCP-direktiivi	Keskisuurten polttolaitosten päästöjä säätelevä direktiivi
MSR	Päästökauppa-markkinoita vakauttava reservi (eng. market stability reserve)
PiPo-asetus	Alle 50 MW energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksia koskeva valtioneuvoston asetus
POK	Kevyt polttoöljy
POR	Raskas polttoöljy
PYR	Pyrolyysiöljy

1. JOHDANTO

Polttoöljyä käytettiin pitkään pääpolttoaineena pienissä kaukolämpöverkoissa edullisten investointikustannusten ja verrattain alhaisen öljyn hinnan vuoksi. Sitten öljyn hinta on noussut ja käynyt useita kertoja erittäin korkealla. Odotettavissa on öljytuotteiden hintakilpailukyvyn laskeminen keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä. Näkymät johtuvat maailman öljyvarojen vähentymisestä ja ilmastotavoitteiden aiheuttamista poliittisista ohjaustoimista. Samaan aikaan tekniikan ja logistiikan kehittyminen on nostanut puuperäisen energian kilpailukykyä.

Tämä diplomityö on tehty Savon Voimalle jatkumona 2000-luvun alussa alkaneelle bioenergiaohjelmalle. Ohjelman tavoitteena oli lisätä erityisesti puuperäisen polttoaineen käyttöä kaukolämmön tuotannossa. Nykyään Savon Voiman tuottamasta vuosittaisesta kaukolämpöenergiasta alle 10 % on peräisin öljystä ja vuonna 2016 öljyn osuuden on tarkoitus olla maksimissaan 5 %. Tässä työssä etsitään liiketaloudellisesti järkeviä toimenpiteitä ja investointeja, joilla öljyn osuutta saadaan edelleen pienennettyä ja vuoden 2016 tavoitteeseen päästään.

Nykyään polttoöljyä käytetään ainoastaan huippu- ja varatehon tuotantoon. Alhaisten investointikustannustensa johdosta öljylämpökeskusten kannattavuus tässä käytössä on tällä hetkellä varsin hyvä, joten kannattavien korvausinvestointien mahdollisuudet ovat hyvin rajalliset. Tämä onkin diplomityössä tutkittava perusongelma. Lisäksi työssä paneudutaan myös toimenpiteisiin, joilla öljyn kulutusta on mahdollista vähentää hyödyntämällä olemassa olevaa laitoskantaa tehokkaammin.

Öljyn käyttöä voidaan vähentää investoimalla vaihtoehtoisia polttoaineita, kuten puupellettejä käyttäviin lämpökeskuksiin. Myös olemassa olevien öljylämpökeskusten muuttaminen toimimaan uusiutuvilla polttoaineilla on mahdollista. Näillä keinoilla voidaan korvata öljyn käyttöä huippu- ja varatehon lähteenä. Kiinteän polttoaineen lämpökeskusten tehoa nostavilla ratkaisuilla, kuten lämpöä talteen ottavilla savukaasupesureilla, voidaan vähentää öljyn käyttöä niissä tilanteissa, joissa kiinteän polttoaineen tuotantolaitoksen teho ennen tehonkorotusta ei riittäisi tarvittavan tehon tuottamiseen. Lämpöakku taas soveltuu tilanteisiin, joissa suurempaa tehoa tarvitaan lyhytaikaisesti. Työssä käsitellään myös muita käytön tehostamiseen liittyviä keinoja, kuten reduktioventtiilin hyödyntämistä, polttoaineen priimausta, kaukolämpöverkon latvapistemittausten hyödyntämistä ja laitosten käyttövarmuuden parantamista.

Öljyn hinta on kesällä 2015 laskenut viime vuosien hintatasoon nähden erittäin alas, johtuen ylitarjonnasta markkinoilla ja Kiinan kasvunäkymien heikentymisestä. Tämä on

heikentänyt vaihtoehtoisten tuotantotapojen kannattavuutta ennestään verrattuna öljylämpökeskuksiin. Tilannetta ei kuitenkaan voi pitää pysyvänä, joten työssä tutkitaan myös tällä hetkellä kannattamattomille investointivaihtoehdoille rajahintoja, joilla öljyn korvaaminen muuttuisi kannattavaksi.

Työssä keskitytään kaukolämmön tuotantoon, eli esimerkiksi kysyntäjousto ja muut kuluttajapäässä vaikuttavat ratkaisut on jätetty työn ulkopuolelle. Työ on toteutettu nykyisen biomassan kestävyysluokittelun perusteella, joten tulokset eivät välttämättä päde, mikäli nämä luokitukset muuttuvat ja puun energiakäyttöä ei katsota ilmastovaikutuksiltaan neutraaliksi.

Työn aluksi käsitellään lyhyesti Savon Voimaa yrityksenä ja sen kaukolämmön tuotannon tämänhetkistä tilannetta. Kappaleessa 2 esitellään kaukolämpötehon ajallista vaihtelua ja tuotantolaitoksia ja polttoaineita, joilla tarvittava teho kunakin ajanhetkenä tuotetaan. Kappaleen lopuksi tarkastellaan eri polttoaineiden hintoja työn kirjoitushetkellä. Kappaleessa 3 esitellään teknisiä ratkaisuja, joilla on mahdollista korvata öljyn käyttöä kaukolämmön huippu- ja varatehon tuotannossa. Kappaleesta valitaan potentiaalisimmat tekniikat tarkempaan tarkasteluun kolmen paikkakunnan kaukolämpöverkoissa. Analyysiin valitut paikkakunnat esitellään kappaleessa 4. Kappaleessa 5 on esitetty kannattavuuslaskelmat lupaavimmille tekniikoille valituilla paikkakunnilla ja reunaehdoilla, joilla öljyn käyttöä olisi niiden avulla taloudellista korvata. Kappaleen lopuksi esitetään suositukset investoinneista kullekin paikkakunnalle. Kappaleeseen 6 on koottu muita kehitysehdotuksia, joiden avulla öljyn kulutusta on mahdollista vähentää. Kappaleessa 7 esitetään johtopäätökset ja suositellaan toimenpiteitä, jotka on nähty kannattaviksi.

1.1 Savon Voima Oyj

Savon Voima Oyj on 21 kunnan omistaman Savon Energiaholding Oy:n tytäryhtiö. Sen liiketoimintaa ovat sähkön ja kaukolämmön tuotanto, myynti ja jakelu sekä energia-alan asiantuntijapalvelut. Savon Voima tuottaa kaukolämpöä 12 savolaiskunnan alueella yhteensä 20 taajamassa. Vuonna 2014 sen liikevaihto oli 188 miljoonaa euroa ja se työllisti noin 175 henkilöä. Kuvassa 1 on esitetty Savon Voiman konsernirakenne ja tärkeimmät osakkuudet 1.1.2014. [1]

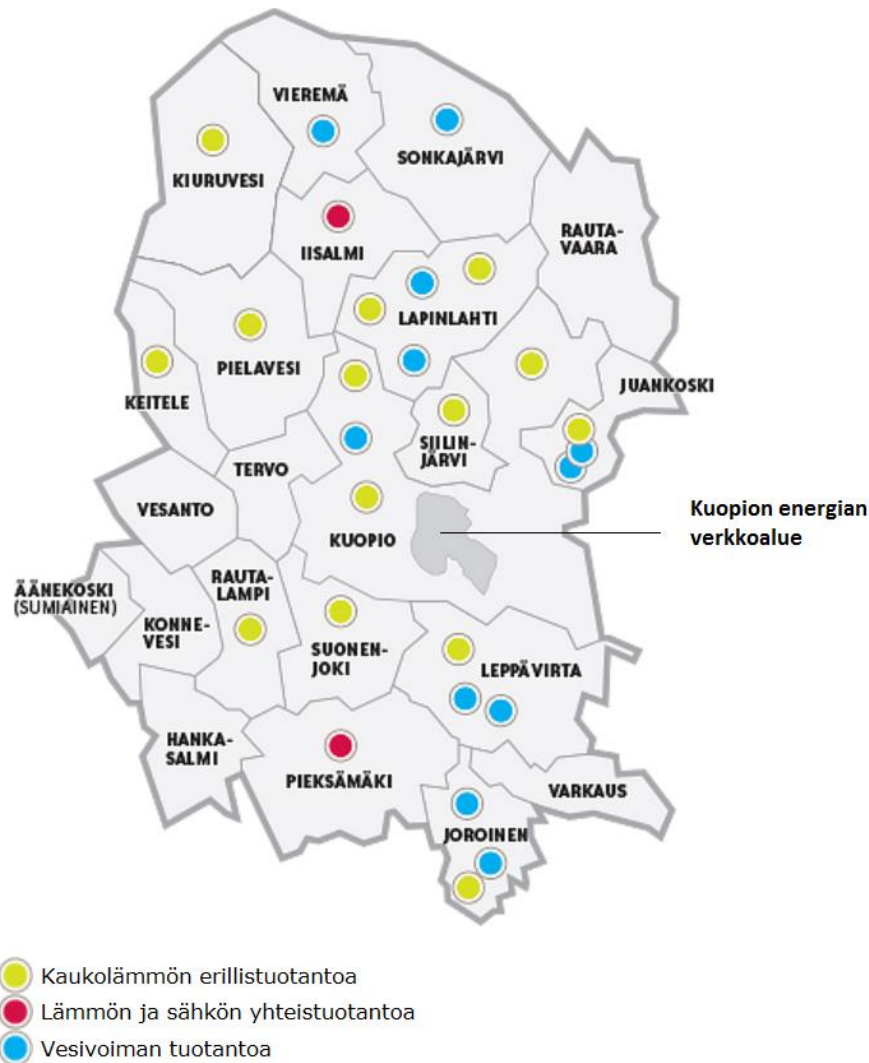


Kuva 1. Savon Voiman konsernirakenne [1]

1.2 Lämpöliiketoiminta

Savon Voiman lämmöntuotannon liikevaihto oli vuonna 2014 42,1 miljoonaa euroa ja myynti 600 GWh. Rakennettua kaukolämpöverkkoa oli yhteensä 359,8 km. Asiakkaista noin puolet on asuintaloja ja loput pääosin yritys- ja teollisuuskiinteistöjä. Savon Voimalla on sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset (CHP) Iisalmessa ja Pieksämäellä. Omaa sähköntuotantoa näissä laitoksissa oli vuonna 2014 yhteensä 61 GWh. Keskimääräisenä vuonna yhteistuotantolaitosten sähkön tuotantomäärä on kuitenkin tätä suurempi, koska Iisalmen CHP-laitoksen höyryturbiini oli vuonna 2014 poissa käytöstä huoltotoimenpiteiden vuoksi maaliskuulle asti. Muissa taajamissa lämpö tuotetaan suurimmaksi osaksi kiinteän polttoaineen (KPA) lämpökeskuksissa, joita on käytössä yhteensä 18 kappaletta. Niiden keskiteho on 5,5 MW. Näiden lisäksi huippu- ja varatehon lähteeksi kaukolämpöverkoissa on yhteensä 63 öljylämpökeskusta. Tuotantolaitosten kokonaislämpöteho on 565 MW. [2]

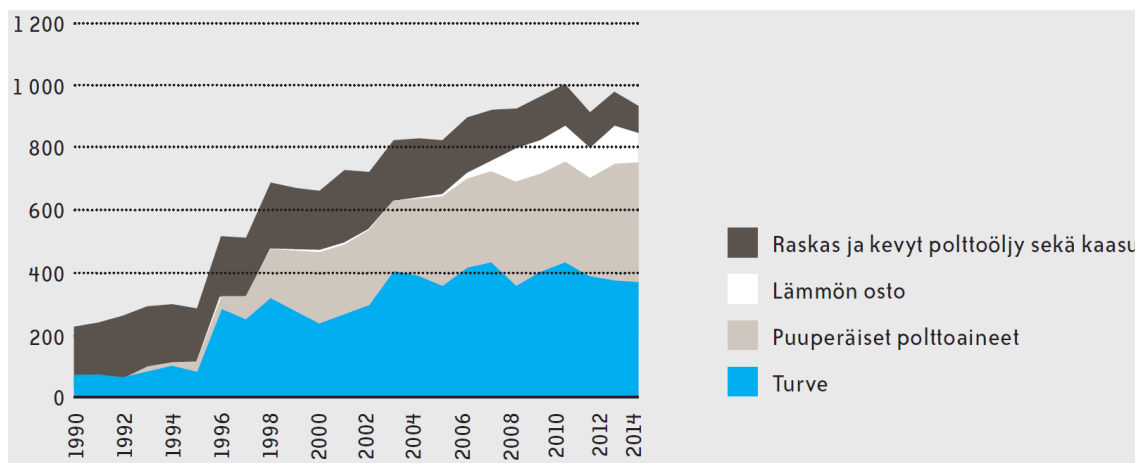
Polttoaineita käytettiin 887 GWh, joista kotimaisten ja lämmön oston osuus oli 93 % ja loput 7 % kevyttä ja raskasta polttoöljyä sekä nestekaasua. Kuvassa 2 on esitetty Savon Voiman sähkönsiirtoalue ja kaukolämpöpaikkakunnat. [1]



Kuva 2. Savon Voiman sähkönsiirtoalue ja kaukolämpöpaikkakunnat [2]

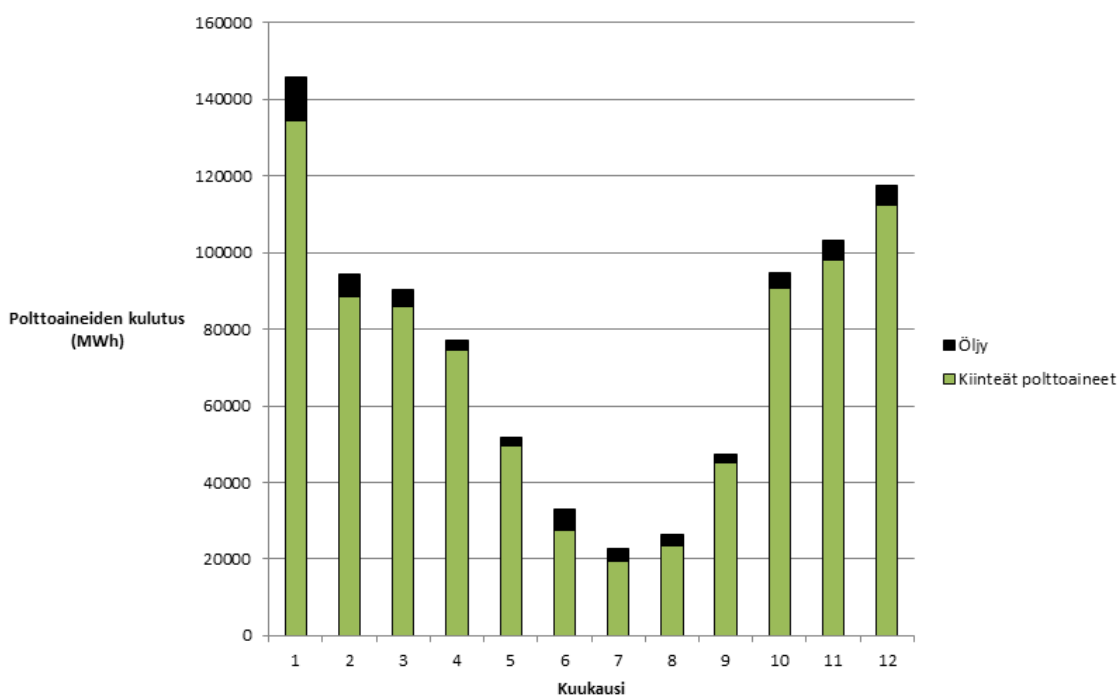
1.3 Bioenergiaohjelma

Savon Voimassa käynnistettiin vuosituhatosen vaihteessa bioenergiaohjelma, jonka tavoitteena on lisätä erityisesti puuperäisen polttoaineen käyttöä. Osana ohjelmaa laadittiin projektimuotoinen selvitysraportti yhteistyössä VTT:n kanssa. [3] Ohjelman seurauksena jokaiseen kaukolämpöverkkoon on rakennettu vähintään yksi kotimaista polttoainetta käyttävä lämpökeskus. Kuvassa 3 on esitetty polttoaineiden käytön kehittyminen vuodesta 1990. [2]



Kuva 3. Polttoaineiden käytön kehittyminen [2]

Kuvasta nähdään, että öljyn osuus käytetyistä polttoaineista on pudonnut tasaisesti 2000-luvun alun lähes kolmanneksesta nykyiseen alle 10 %:iin viimeisen 15 vuoden kuluessa. Tavoitteena on edelleen pienentää öljyn kulutusta ja lisätä erityisesti puuperäisten polttoaineiden käyttöä. Jatkossa painopiste on kuitenkin enemmän energiatehokkuuden parantamisessa, joka toteutetaan esimerkiksi investoimalla lämmön talteenottolaitteistoihin. [2] Kuvassa 4 on esitetty öljyn osuus polttoaineiden käytöstä Savon Voiman kaikissa kaukolämpöverkoissa kuukausittain vuonna 2014.



Kuva 4. Polttoöljyjen osuus polttoaineiden käytöstä kuukausittain

Kuvasta nähdään että öljyn käyttö jakautuu melko tasaisesti vuoden jokaiselle kuukaudelle. Talvikuukausina sitä kuluu määrällisesti enemmän, mutta suhteellinen osuus on kesäkuukausina jopa suurempi kuin talvella. Vuoden 2014 alku oli kuitenkin

poikkeuksellisen lämmin, joten keskimääräisenä vuonna talvikuukausina öljyn osuus on suurempi kuin kuvassa 4. [4]

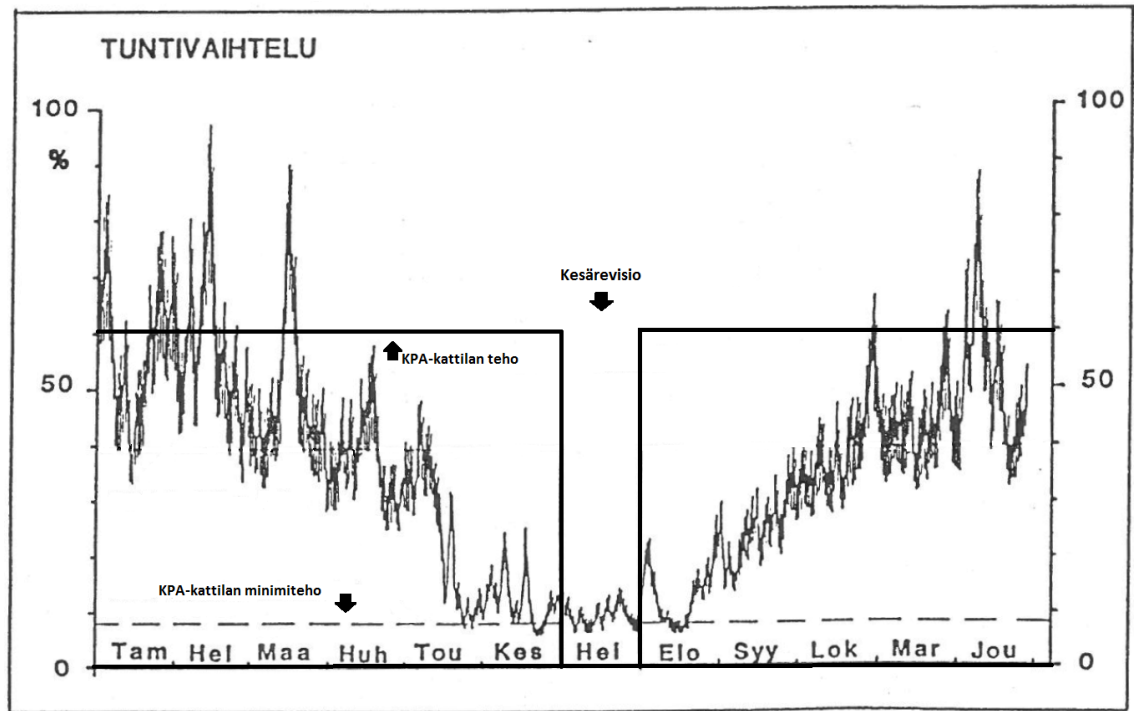
Talven aikainen öljyn käyttö aiheutuu, kun lämpötila laskee niin alas, ettei KPA-tuotantolaitoksen teho riitä kattamaan verkon tehon tarvetta. Kesällä öljyn käyttöä aiheuttavat KPA-laitosten revisiot niissä kaukolämpöverkoissa, joissa varatehon lähteeksi ei ole toista kiinteän polttoaineen lämpökeskusta. Myös ongelmat KPA-laitoksilla aiheuttavat satunnaista tarvetta öljykäyttöiselle varateholle.

2. LÄMMÖN TUOTANTO

Kaukolämpöverkon tehotarve vaihtelee voimakkaasti ulkolämpötilan mukaan. Keskitetyssä lämmön tuotannossa on yleensä kustannustehokkainta jakaa tuotanto eri tuotantomuotojen kesken, mutta pienissä kaukolämpöverkoissa ei kuitenkaan ole järkevää rakentaa todella monia tuotantoyksiköitä. Yleensä perus- ja huipputeho kannattaa kuitenkin tuottaa erillisillä yksiköillä. Tuotantomuodot jaetaan tyypillisesti peruskuormalaitoksiin, keskikuormalaitoksiin, huippukuormalaitoksiin ja varateholaitoksiin. Tässä kappaleessa esitellään tyypillisen kaukolämpöverkon tehon vaihtelu ajan suhteen ja erilaiset tuotantolaitostyypit, joilla tehontarpeeseen eri tilanteissa vastataan. [5]

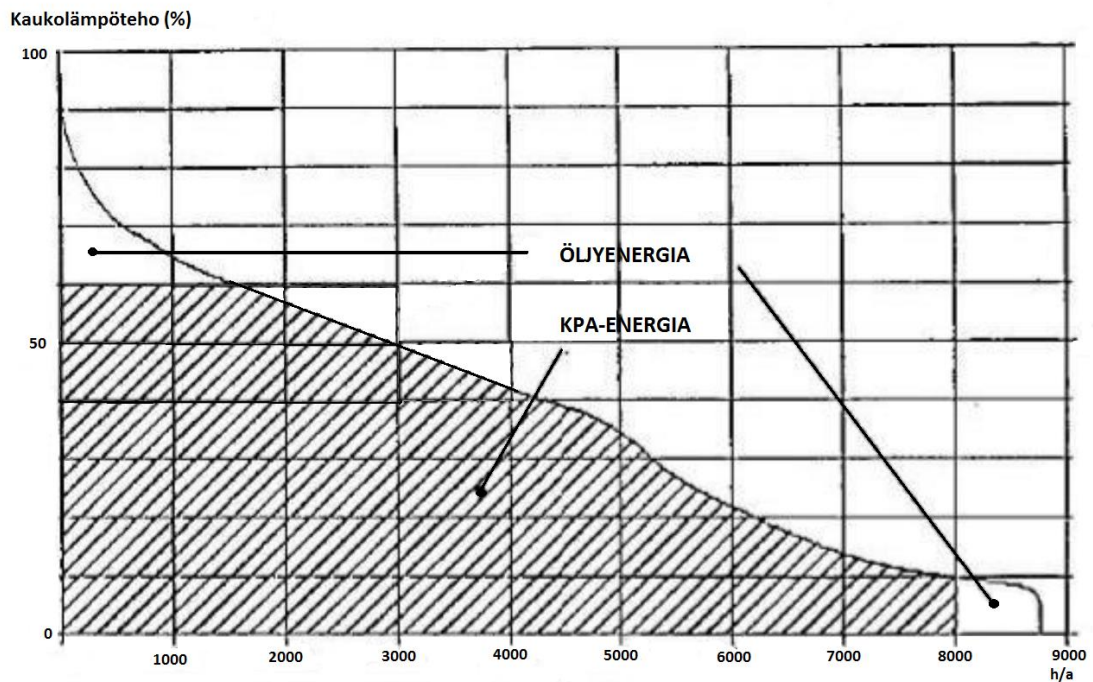
Peruskuormalle jokaisessa Savon Voiman kaukolämpöverkossa on nykyään kiinteän polttoaineen lämpökeskus tai lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos. Suurimmissa verkoissa keskikuorman tuottamiseen käytetään nykyään aiemmin peruskuormakäytössä ollutta pienempää KPA-lämpökeskusta. Muutamilla paikkakunnilla käytössä on keskikuorma-ajoon myös pellettikäyttöisiä lämpökeskuksia. Pienissä kaukolämpöverkoissa kiinteän polttoaineen lämpökeskus on yleensä mitoitettu varsin suureksi, jolloin sillä voidaan tuottaa sekä perus- että keskikuorma. Näiden lisäksi tarvitaan huippu- ja varatehoa, johon yleisin valinta on öljylämpökeskus.

Kuvassa 5 on esitelty kaukolämpöverkon tyypillinen tehovaihtelu vuoden aikana ja tyypillisesti mitoitettun KPA-kattilan teho suhteessa tähän. Kuvan 5 KPA-lämpökeskus on mitoitettu 60 %:iin verkon huipputehontarpeesta.



Kuva 5. Kaukolämpöverkon tehonvaihtelu ja 60 %:iin huipputehosta mitoitettu peruskuormalaitos. Muokattu lähteestä [5]

Kun vuoden aikana esiintyneet tuntitehot järjestetään suuruusjärjestykseen, saadaan lämmöntarpeen pysyvyyskäyrä, joka on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Lämmöntarpeen pysyvyyskäyrä. Muokattu lähteestä [5]

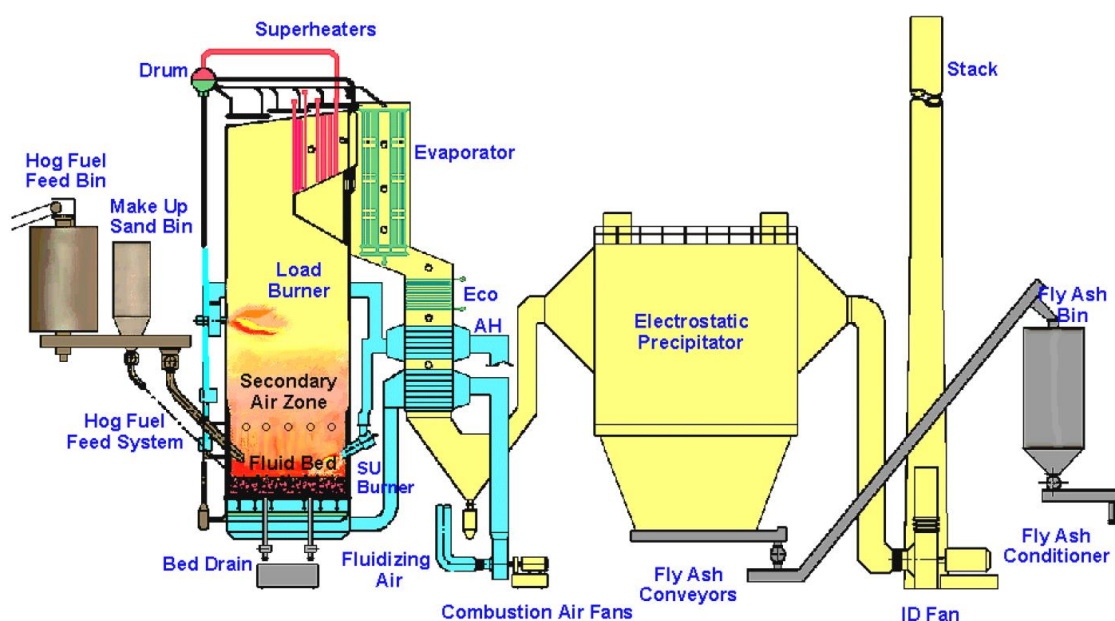
Kuvista nähdään, että vaikka talvikuukausina tarvitaan keski- ja huippukuormalaitoksia, oikein mitoitetulla peruskuormalaitoksella pystytään tuottamaan valtaosa vuoden lämmitysenergiasta. Kuvan 6 pysyvyyskäyrä esittää pienehköä kaukolämpöverkkoa, jossa on KPA-lämpökeskus peruskuormalle ja öljylämpökeskus huippukuorma-ajoon. Nykyään öljyn kallistuttua ja kattiloiden minimitehon laskettua pienien verkkojen peruskuormalaitos on kannattavaa mitoittaa jopa 70 %:iin huipputehosta. Suurissa verkoissa peruskuormalaitoksen mitoitus tehdään pienemmäksi ja käytössä on myös keskikuormalaitos.

2.1 Peruskuormalaitokset

Bioenergiaohjelman johdosta pääenergianlähteenä Savon Voiman jokaisessa kaukolämpöverkossa on nykyään puuperäinen polttoaine, turve tai näiden seos. Ne ovat edullisia hinnaltaan, mutta niitä käyttävät laitokset ovat investointikustannuksiltaan korkeita. Tämän vuoksi niitä käytetään peruskuorma-ajossa, eli niille pyritään saamaan mahdollisimman korkeat huipunkäyttöajat. Huipunkäyttöaika saadaan, kun jaetaan tuotantoyksikön vuodessa tuottama energiamäärä sen huipputeholla. Peruskuormalaitoksilta vaaditaan korkeaa käytettävyyttä ja edullisia käyttökustannuksia. [5]

2.1.1 Savon voiman käytössä olevat kattilatyypit

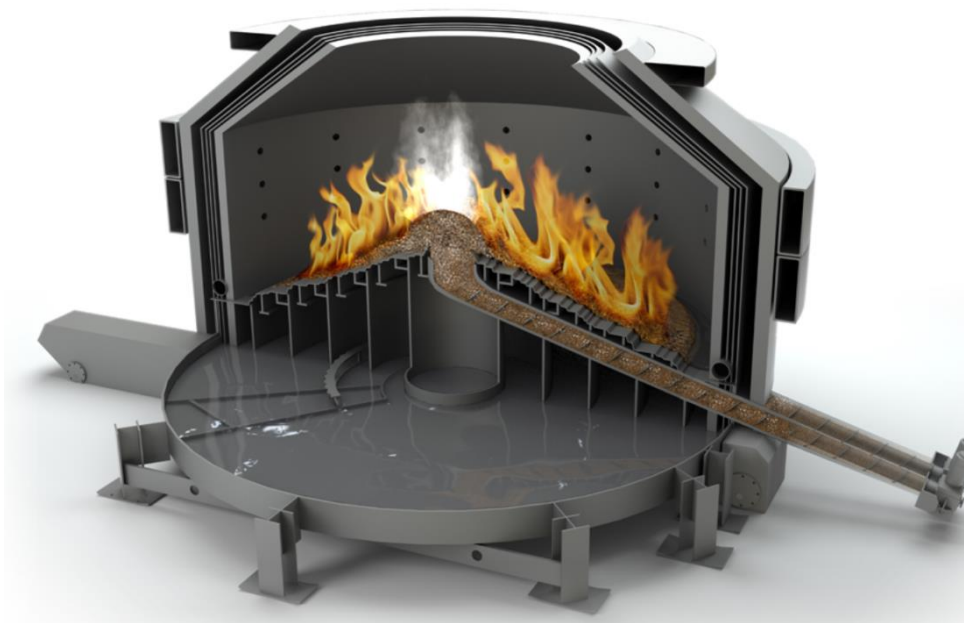
Iisalmessa ja Pieksämäellä peruskuormalaitoksena toimivat haketta ja jyrshinturvetta polttoaineenaan käyttävät CHP-voimalaitokset, joissa palaminen tapahtuu leijukerroskattilassa. Kuvassa 7 on esitelty leijukerroskattila ja sen apulaitteet.



Kuva 7. Leijukerroskattilan rakenne [6]

Leijukerroskattilassa palaminen tapahtuu hiekkakerroksessa, joka ”kuplii” kerroksen alta puhallettavan primääri-ilman vaikutuksesta. Leijutusmateriaalin raekoko on noin 1 mm. Leijutusmateriaalin suuren lämpökapasiteetin johdosta kattilatyypin soveltuu myös erittäin huonolaatuisille ja kosteille polttoaineille. Polttoainetta ei myöskään tarvitse jauhaa ennen kattilaan syöttämistä. [7]

Muilla paikkakunnilla peruskuormaa ajetaan arinakattiloilla, joissa polttoaineena on yleisimmin hake, palaturve, kuori, sahanpuru tai näiden seos. Käytössä on sekä viisto- että kekoarinakattiloita. Kuvassa 8 on esitetty kekoarinan rakenne.



Kuva 8. Kekoarinan rakenne [8]

Kekoarinalla polttoaine syötetään arinan alta arinan keskelle, josta se vähitellen putoaa pyörivien arinarautojen vaikutuksesta alaspäin ja käy läpi kiinteän polttoaineen palamisen vaiheet, eli kuivumisen, pyrolyysin, kaasuuntumisen ja jäännöshiilen palamisen. Viistoarinalla palaminen tapahtuu kallistetulla tasolla. Primääri-ilma syötetään polttoainepatjaan arinan läpi ja sekundääri-ilma polttoainepatjan päältä. Arinakattiloiden polttoaine on oltava kuivempaa ja tasalaatuisempaa kuin leijukerroskattiloiden. Märkä ja epähomogeeninen polttoaine aiheuttaa helpommin ongelmia arinakattiloissa kuin leijukerroskattiloissa. [7]

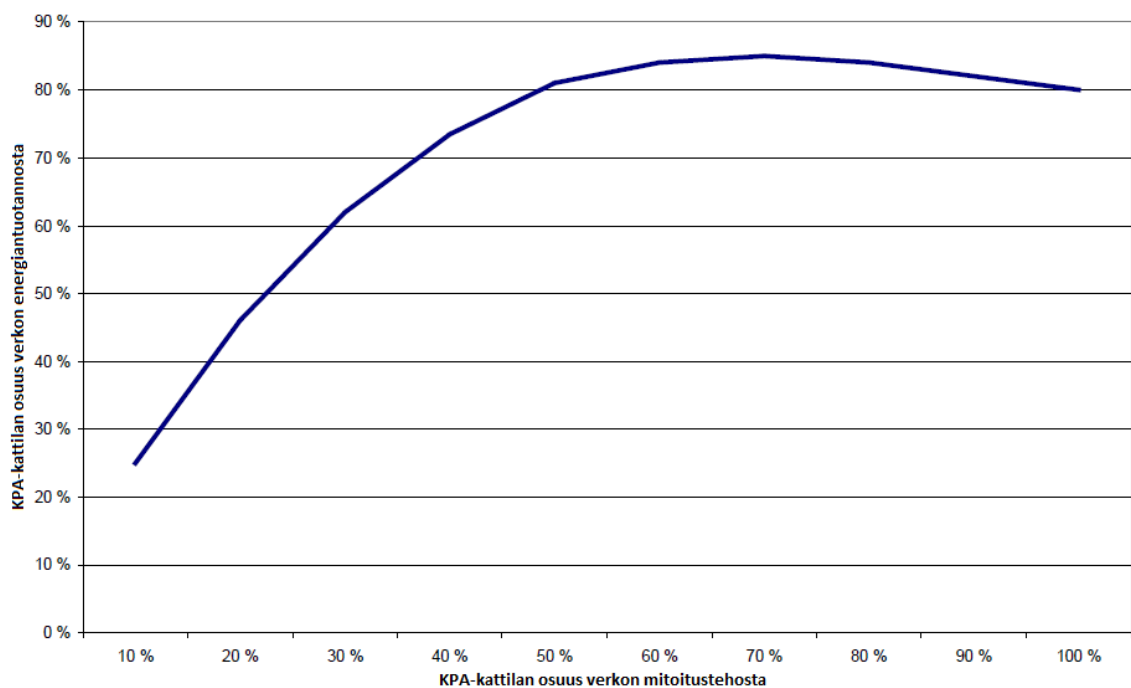
2.1.2 Peruskuormalaitosten mitoitus

Iisalmissa ja Pieksämäellä CHP-laitokset ajetaan syksyllä ylös heti, kun verkon kaukolämpökuorma on laitoksen minimitehon suuruinen ja optimitilanteessa laitosta ajetaan yhtäjaksoisesti seuraavan kesän revisioon asti. Muissa verkoissa peruskuormalaitos on poissa käytöstä ainoastaan kesärevision ajan. Suurten laitosten alas- ja ylösajaminen on hidasta ja kuluttaa laitteistoa, joten ne ajetaan alas ainoastaan

vikatilanteissa, tai kun kaukolämpökuorma tippuu pidemmäksi aikaa kattilan minimitehon alapuolelle. Yhden KPA-lämpökeskuksen kaukolämpöverkoissa peruskuormalaitos on mitoitettu siten, että sen minimikuorma on pienempi kuin verkon kesäkuorma, jotta niitä pystytään käyttämään ympäri vuoden lukuun ottamatta kesän revisiota.

Kaukolämpöverkon peruskuormalaitos mitoitetaan suurissa kaukolämpöverkoissa yleensä noin 50 %:iin verkon huipputehontarpeesta. Tällöin laitokselle saadaan mahdollisimman suuri huipunkäyttöaika, eli tuotettua jopa 80 - 90 % vuosienergiantarpeesta. Savon Voiman pienissä verkoissa, joissa ei ole kannattavaa rakentaa erillistä keskikuormalaitosta, peruskuormalaitos mitoitetaan noin 70 %:iin huipputehontarpeesta. Laitosta ei kannata mitoittaa suuremmille tehoille, koska kattiloiden minimiteho on yleensä noin 10 - 20 % nimellistehosta. Pieniä kuormia ajetaan sammuttamalla polttoaineensyöttö ja puhaltimet hetkittäin ja käynnistämällä ne taas kun menoveden lämpötila laskee tietyn rajan alle. Pienillä kuormilla palamisen hallinta kuitenkin hankaloituu, hyötysuhde laskee ja kattilan lämmönsiirtopinnat likaantuvat nopeammin, joten liian suureksi mitoitettua kattilaa ei ole kannattavaa käyttää kesäkuukausina jolloin lämmöntarve on alhainen. [9]

Kuvassa 9 on esitetty yhden KPA-kattilan osuus tuotetusta energiasta mitoitus-tehon suhteen Suomen olosuhteissa 95 %:n käytettävyydellä ja 20 %:n minimikuormarajoituksella.



Kuva 9. KPA-kattilan osuus tuotetusta energiasta mitoitus-tehon funktiona Suomen olosuhteissa [9]

Kuvasta nähdään, että laitoksen osuus tuotetusta energiasta ei juurikaan enää kasva Suomen olosuhteissa sen jälkeen, kun sen teho kattaa 50 % kaukolämpöverkon tehon tarpeesta. Investointikustannukset kuitenkin nousevat suuremmaksi mitoitettulla kattilalla. Verkon tehonvaihelusta ja tuotantolaitoksen minimitehosta riippuen osuus tuotetusta energiasta alkaa jopa laskea, kun kattilan mitoitus ylittää noin 70 % verkon mitoitustehosta. Tämä johtuu siitä, että laitoksen minimiteho nousee verkon kesäkuormaa suuremmaksi. Kuvaajan muoto vaihtelee verkon tehon tarpeen vaihtelun ja laitoistyyppin mukaan mutta noudattaa samaa periaatetta.

Mitoitusta suunniteltaessa on otettava huomioon myös odotettavissa oleva verkon tehon tarpeen muutos tulevaisuudessa. Tehon tarpeen kasvua aiheuttavat verkkoon liittyvät uudet asiakkaat. Savon Voiman toiminta-alue koostuu tosin lähinnä pienistä itäsuomalaisista muuttotappiopaikkakunnista, joten useimmilla paikkakunnilla asiakkaiden määrä tuskin kasvaa merkittävästi tulevaisuudessa. Lämmön tarpeen vähenemistä aiheuttavat tiukkenevat rakennusten energiatehokkuusmääräykset ja ilmastomuutoksen vaikutukset ulkolämpötiloihin. Ilmastomuutoksen on arvioitu vähentävän pakkaspäivien määrää noin kolmasosalla Pohjois-Suomessa ja jopa puolella muualla Suomessa vuosisadan kolmannella neljänneksellä. [10] Muutos tapahtuu vähitellen, joten asiakaskohtaisen lämmöntarpeen voidaan ennustaa tulevaisuudessa hiljalleen vähentyvän.

Verkoissa, joissa on vain yksi KPA-kattila, joudutaan väistämättä tuottamaan osa lämpöenergiasta talven huippupakkasilla ja kesärevision aikaan muilla keinoin. Useamman KPA-laitoksen rakentaminen ei välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa, koska niiden investointikustannukset ovat moninkertaiset esimerkiksi öljykattilaan verrattuna. Jos yhdellä KPA-kattilalla tuotetaan jo esimerkiksi 85 % vuosienergiasta, eivät toisen KPA-laitoksen käyttötunnit ole välttämättä riittävän suuret, jotta edullisempi polttoaine maksaisi takaisin kattilan suuremmat investointikustannukset. Myöskään kahta KPA-laitosta ei ole kannattavaa mitoittaa tehoiltaan kattamaan verkon mitoitustehoa, koska investointikustannukset nousevat laitokseen kasvaessa huomattavasti ja tuotettu energiamäärä vain hieman. [5]

2.2 Keskikuormalaitokset

Keskikuormalaitokselta vaaditaan taloudellisuutta myös osateholla koska peruskuormalaitosta pyritään yleensä ajamaan mahdollisimman suurella teholla alhaisempien tuotantokustannusten takia. Tällöin verkon tehon tarpeen muutoksiin vastataan säätämällä keskikuormalaitosta. Keskikuormalaitoksen investointikustannusten täytyy olla edullisemmat huipputehoa kohti kuin peruskuormalaitoksella, koska huipunkäyttöaika on pienempi. Yleisin ratkaisu keskikuormalle on perinteisesti ollut joko raskas- tai kevytpolttoöljykäyttöinen lämpökeskus edullisten investointikustannusten, hyvän säädettävyyden ja nopean käynnistyvyyden vuoksi. [5]

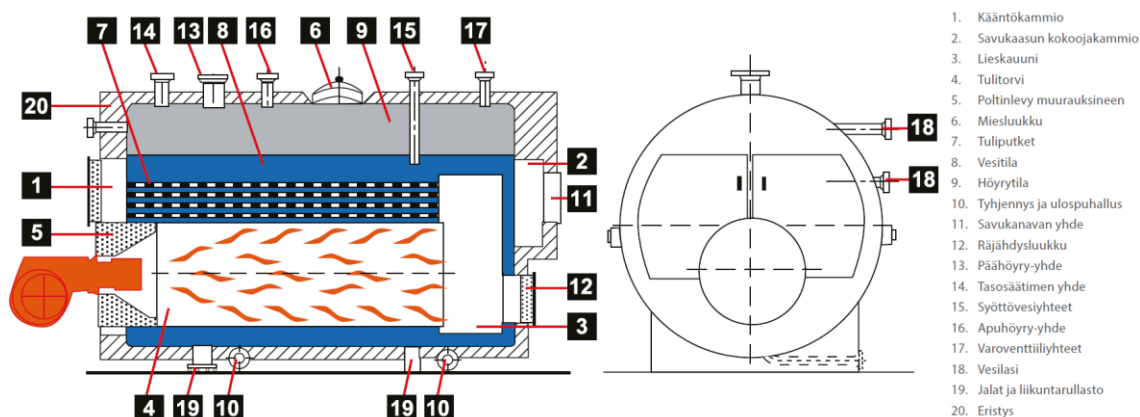
Ne ovat olleet luonnollinen ratkaisu, koska öljykäyttöisiä lämpökeskuksia on verkoissa valmiiksi rakennettuina ajalta, jolloin raskaalla polttoöljyllä tuotettiin myös kaukolämmön peruskuormaa. Pieniin kaukolämpöverkkoihin KPA-lämpökeskukset on taloudellista mitoittaa varsin suuriksi, jolloin varsinaista keskikuormalaitosta ei tarvita.

Savon Voiman voimalaitospaikkakunnilla, eli Pieksämäellä ja Iisalmessa keskikuorman tuotannossa toimivat aiemmin peruskuormalaitoksina olleet pienemmät KPA-lämpökeskukset. Myös Kiuruvedellä, Pielavedellä ja Leppävirralla on keskikuormakäytössä vanha pienempi KPA-lämpökeskus. Joroisiin valmistui keskikuormalle vuonna 2015 pelletin arinapolttoon hyödyntävä laitos. Lapinlahdella sekä keski- että huippukuormaa ajetaan pelletin pölypolttoa hyödyntävällä laitoksella.

Yleinen ratkaisu keskikuorman tuotantoon suurissa kaukolämpöverkoissa on siis pienempitehoinen KPA-lämpökeskus tai maakaasuverkon alueella maakaasukattila. Viime aikoina Suomessa on rakennettu keskikuormalle ja kesärevision aikaisen tehon tuottamiseen myös useita pelletin pölypolttolaitoksia. Pelletin pölypolttolaitokset ovat Suomessa varsin uutta tekniikkaa, joka vertautuu ylösajo- ja säätövyysnopeudessa öljypolttimiin. Pellettilämpökeskuksia on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.

2.3 Huippu- ja varateholaitokset

Huippu- ja varateholaitosten täytyy olla tehoonsa nähden edullisia hinnaltaan ja nopeasti käynnistettävissä, kun tehoa tarvitaan. Polttoaineen hinta ei ole niin merkittävä tekijä, koska huipunkäyttöaika on hyvin lyhyt. Huippukuormille ja varatehonlähteeksi jokaisessa Savon Voiman kaukolämpöverkossa on kevyt- ja raskasöljykäyttöisiä lämpökeskuksia. Suurissa kaukolämpöverkoissa öljylämpökeskukset ovat lähinnä varatehon lähteenä, koska niissä kiinteän polttoaineen kapasiteetti riittää erittäin alhaisiin ulkolämpötiloihin asti. Myös pienemmissä verkoissa suureksi mitoitettujen KPA-lämpökeskusten ansiosta öljyä kuluu erittäin vähän, tyypillisesti alle 10 prosenttia kokonaispolttoaineiden käytöstä, minkä vuoksi niiden korvaaminen on erittäin vaikeaa markkinaehtoisesti. Öljykäyttöiset kattilat ovat rakenteeltaan tulitorvi-tuliputkikattiloita, joiden rakenne on esitetty kuvassa 10.

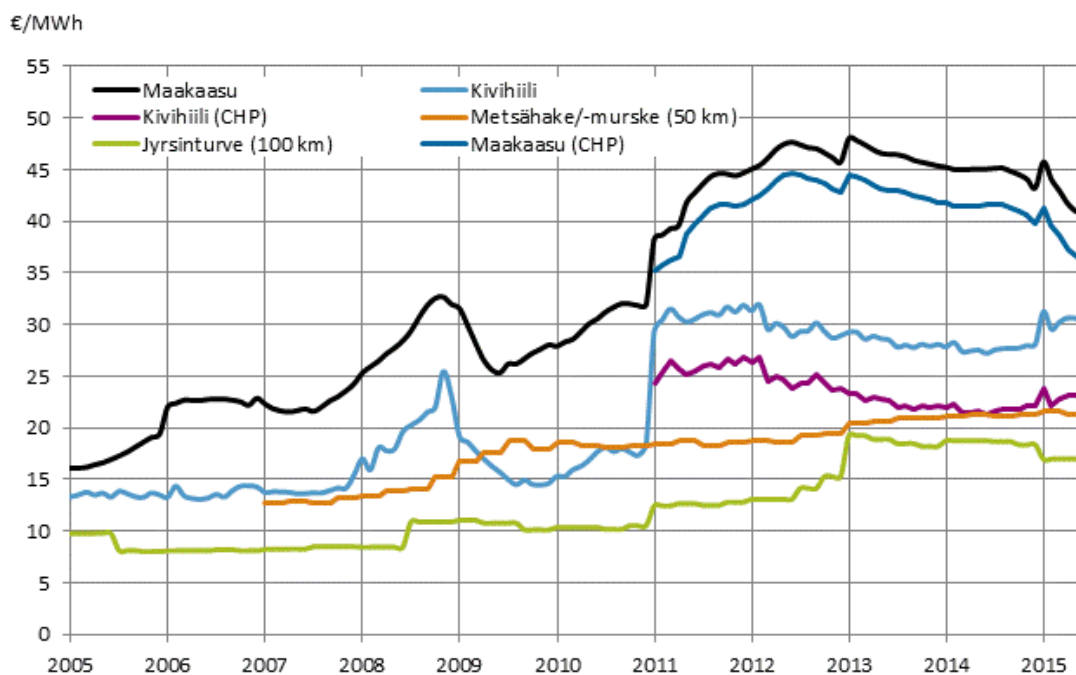


Kuva 10. Tulitorvi-tuliputkikattilan rakenne [11]

Raskasta polttoöljyä käyttävät lämpökeskukset korvattaneen suurimmaksi osaksi vähitellen kevyttä polttoöljyä käyttävillä laitoksilla vuoden 2018 alussa voimaan astuvan MPC-direktiivin takia. [12] Raskasta polttoöljyä olisi vielä mahdollista käyttää, mutta päästörajojen takia olisi käytettävä erittäin vähärikkistä raskasta polttoöljyä, joka ei ole oleellisesti kevyttä polttoöljyä edullisempaa. Jo nyt niin sanotun PiPo-asetuksen vuoksi uusissa POR-kattiloissa päästöraja on $350 \text{ mg/m}^3\text{n}$. Vuoden 2018 alusta alkaen vanhoissa huippu- ja varatehokattiloissa päästöraja on $850 \text{ mg/m}^3\text{n}$ ja peruskuormalaitoksissa $350 \text{ mg/m}^3\text{n}$. [13] Vuoden 2025 alusta alkaen raja kaikissa laitoksissa on $350 \text{ mg/m}^3\text{n}$. Käytännössä $350 \text{ mg/m}^3\text{n}$ päästöraja tarkoittaa, että laitoksissa voi käyttää maksimissaan 0,2 m- % ja $850 \text{ mg/m}^3\text{n}$ 0,5 m- % rikkiä sisältävää raskasta polttoöljyä. Raskasöljylämpökeskuksilla on myös korkeammat käyttökustannukset, koska säiliöt vaativat jatkuvan lämmityskierron jotta öljy on pumpattavissa. Tästä syystä raskas polttoöljy tuskin on kilpailukykyistä, vaikka vähärikkiset vaihtoehdot olisivat hieman edullisempia kuin kevyt polttoöljy. Tästä poikkeuksen tekevät pohjavesialueella sijaitsevat öljylämpökeskukset, joihin on vaikea saada ympäristölupaa kevyen polttoöljylle, koska se vahinkotapauksissa läpäisee maakerrokset huomattavasti raskasta polttoöljyä paremmin. Tällaisissa kohteissa tullaan käyttämään raskasta polttoöljyä vielä tulevaisuudessakin, koska uuden lämpökeskuksen investoiminen toiselle alueelle on hintavaa. Lisäksi raskaan polttoöljyn käyttömahdollisuus pienentää polttoaineiden hintojen vaihtelusta aiheutuvaa riskiä.

2.4 Polttoaineiden hinnat

Polttoainekustannukset muodostavat voima- ja lämpölaitoksille suurimman yksittäisen muuttuvan kustannuserän. Kuvassa 11 on esitetty eräiden voimalaitospolttoaineiden hintakehitys mukaan lukien valmisteverot (0 % ALV) vuosina 2005 - 2015.



Kuva 11. Voimalaitospolttoaineiden hintakehitys [14]

Kuvasta nähdään, että kotimaisten polttoaineiden hintakehitys on ollut vakaata verrattuna tuontipolttoaineisiin. Turve ja puuperäiset polttoaineet myös ovat hinnaltaan kilpailukykyisiä. Investointeja vertailtaessa kiinteän polttoaineen lämpökeskuksille jotka käyttävät polttoaineenaan puuperäisiä polttoaineita ja turvetta käytetään polttoaineelle hinta-arviona 20 €/MWh. Puuperäisten polttoaineiden hintakilpailukyky todennäköisesti tulee pysymään hyvänä päästökaupan kiristyessä. Vuoden 2015 keväällä EU:n parlamentti hyväksyi päästöoikeuksille markkinoita vakauttavan reservin (MSR), joka otetaan käyttöön vuoden 2019 alusta. Tämä todennäköisesti tulee nostamaan päästöoikeuksien hintaa. Reserviin siirretään päästöoikeuksia ylitarjontatilanteessa ja niitä voidaan palauttaa sieltä markkinoille kysynnän kasvaessa. [15]

Puuperäisen bioenergian kestävyys on viime aikoina herättänyt keskustelua EU:ssa ja onkin odotettavissa, että sen suhteen tehdään uusia päätöksiä lähivuosina. Puun kaskadikäyttö on ollut yksi keskustelua herättäneistä aihepiireistä. Kaskadikäytöllä tarkoitetaan, että puuta käytetään tuotteena tai materiaalina vähintään kerran, mieluummin useampia kertoja, ennen kuin se hävitetään tai loppusijoitetaan. Euroopan komissio on ottanut kaskadikäytön edistämisen puolesta kantaa esimerkiksi kiertotaloutta koskevassa tiedonannossaan (COM(2014)398), metsästrategiassa (COM(2013)659) ja biopolttoaineiden kestävyyttä käsitelleessä ILUC-direktiivissä. Komissio myös teettää parhaillaan selvitystä puun kaskadikäytön optimoinnista. Kaskadikäytön määrittely on vielä kesken ja onkin vielä epäselvää, olisiko esimerkiksi suora tähteiden (esimerkiksi sahanpuru tai kuori) energiakäyttö kaskadikäyttöä vai ei. Näillä päätöksillä voi olla vaikutusta puun energiakäytön kilpailukykyyn. [16]

Vuoden 2015 kesällä raakaöljyn hinta on pudonnut tasolle 40–50 \$/barreli, joka heikentää esimerkiksi pellettien ja pyrolyysiöljyn hintakilpailukykyä. Nykyisillä raakaöljyn hinnoilla kevyen polttoöljyn hinta on noin 60–70 €/MWh ja raskaan polttoöljyn noin 40–50 €/MWh. Lokakuussa 2015 kevyen polttoöljyn hinta oli veroineen 77,6 snt/l, eli ilman arvonlisäveroa 61 €/MWh [17] [18]. Raskaan polttoöljyn hinta samaan aikaan oli 0,67 €/kg verollisena eli ilman arvonlisäveroa 47 €/MWh [19] [18]. Useimmissa laskelmissa käytetään korvattavalle öljylle hintaa 60 €/MWh, koska kappaleessa 2.3 esitellyn rikkidirektiivin takia raskaan polttoöljyn käyttö vähenee tulevaisuudessa huomattavasti. Raakaöljyn viime vuosien hintakehitys on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Raakaöljyn hintakehitys [20]

Savon Voiman kaukolämpöverkoista ainoastaan Iisalmi ja Pieksämäki kuuluvat päästökaupan piiriin. Päästöoikeuksien hinnalla on polttoöljyjen hintakilpailukykyyn vain varsin pieni merkitys. Esimerkiksi kevyellä polttoöljyllä ominaispäästökerroin on $0,267 \text{ t}_{\text{CO}_2}/\text{MWh}$ [21] ja päästöoikeuden hinta tällä hetkellä noin $8 \text{ €/t}_{\text{CO}_2}$. [22] Tällöin päästöoikeuden hankinnasta aiheutuva lisähinta kevyelle polttoöljylle on vain noin 2 €/MWh.

Puupellettien hinta syksyllä 2015 on noin 35 €/MWh [23]. Niiden kilpailukyky suhteessa raskaaseen polttoöljyyn on tällä hetkellä huomattavasti huonompi kuin viime vuosina keskimäärin, kun otetaan huomioon suuremmat investointikustannukset ja pellettikattiloiden hitaampi ylösajo ja säädettävyys. Edellisessä kappaleessa mainitut vuoden 2018 alusta alkaen tiukkenevat hiukkas- ja rikkipäästörajat tulevat kuitenkin nostamaan jälleen pellettien hintakilpailukykyä, kun se siirtyy korvaamaan kalliimpaa kevyttä polttoöljyä.

Nestemäisiä biopolttoaineita, kuten bioetanolia tai biodieseliä olisi teknisesti mahdollista käyttää korvaamaan fossiilisia öljyjä lämpökeskuskäytössä. Tässä työssä niitä ei kuitenkaan käsitellä, sillä niiden hinnat ovat huomattavasti korkeammat kuin fossiilisilla öljyillä, pelleteillä tai pyrolyysiöljyllä. Suurempi hinta johtuu myös siitä, että niitä ohjataan verotuksella liikennekäyttöön, jossa öljyn korvaaminen

vaihtoehtoisilla polttoaineilla on teknisesti vielä haastavampaa kuin lämmön tuotannossa. [24]

3. KÄYTETTÄVYYSANALYYSIT

Tässä kappaleessa esitellään tekniikoita, joilla on mahdollista korvata öljyn käyttöä keski- tai huippukuormakäytössä tai varatehon lähteenä. Käsittelyyn otettuja uusiutuvia energianlähteitä ovat biopolttoaineista pyrolyysiöljy ja puupelletit. Lisäksi tutkitaan aurinkolämmön mahdollisuuksia kaukolämmön tuotannossa. Sähkökäyttöisistä vaihtoehtoista tarkastelussa ovat sekä lämpöpumput että suoran sähkölämmityksen käyttö. Jo rakennettujen KPA-lämpökeskusten hyötysuhdetta ja huipputehoa nostavat lämmön talteenottoesurit ovat myös tarkastelun kohteena. Lisäksi tarkastellaan lämpöakkujen käyttöä kaukolämmön tuotannon yhteydessä.

3.1 Pyrolyysiöljy

Pyrolyysiöljyllä (PYR) tarkoitetaan puuperäisestä biomassasta, kuten hakkuutähteistä, ensiharvennuspuusta tai metsäteollisuuden sivutuotteista nopealla pyrolyysillä saatavaa bioöljyä, jota voidaan käyttää öljykattiloissa korvaamaan raskasta polttoöljyä. Fortum tuottaa pyrolyysiöljyä Joensuussa sijaitsevan CHP-tuotantolaitoksen yhteydessä. Integroimalla tuotanto esimerkiksi CHP-laitoksen tai metsäteollisuusintegraatin yhteyteen saavutetaan monia etuja verrattuna pyrolyysiöljyn erillistuotantoon.

Pyrolyysiöljyn fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet poikkeavat huomattavasti fossiilisista polttoöljyistä. Sen kaupallinen käyttö lämmityskattiloissa on vasta pilottivaiheessa. Savon Voimalla on Iisalmissa öljylämpökeskus, johon on tehty tarvittavat muutokset pyrolyysiöljyn käytön mahdollistamiseksi. Kattilan huipputeho kevyellä polttoöljyllä on 12,8 MW ja pyrolyysiöljyllä siitä on saatu tehoa polttokokeessa noin 7,8 MW. Kokeissa polttimeen säädöt ovat kuitenkin olleet epäoptimaaliset, joten korkeampiin tehoihin on todennäköisesti mahdollista päästä.

3.1.1 Pyrolyysiöljyn ominaisuudet

Pyrolyysiöljy voidaan ajatella veden ja vesiliukoisten orgaanisten yhdisteiden mikroemulsioksi, jonka seassa on veteen liukenemattomia ligniini johdannaisia. Pyrolyysiöljyssä on tyypillisesti korkea vesi- ja kiintoainepitoisuus ja sen tiheys on fossiilisia öljyjä suurempi. Se on hapanta, sen lämpöarvo on noin puolet polttoöljyjen lämpöarvosta ja siinä tapahtuu kemiallisia muutoksia lämmitettäessä ja pitkäaikaisessa varastoinnissa. Bioöljy on voimakkaasti poolista, joten se ei liukene fossiilisiin öljyihin. Bioöljylle ei ole vielä vakiintunut standardilaatuja, mutta vuonna 2009 julkaistiin ASTM D7544 -09 -standardi, joka määrittelee fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet

biomassasta tuotetulle pyrolyysiöljylle, joka on tarkoitettu teollisille polttimille. Taulukossa 1 on esitelty tyypillisen pyrolyysiöljyn ominaisuuksia. [25]

Taulukko 1. Pyrolyysiöljyn ominaisuuksia [25]

Ominaisuus	Tyypillinen pyrolyysiöljy
Vesipitoisuus, p- %	20 - 30
Kiintoainepitoisuus, p- %	< 0,5
Tuhkapitoisuus, p- %	0,01 - 0,2
Typpipitoisuus, p- %	< 0,4
Rikkipitoisuus, p- %	< 0,05
Kemiallinen stabiilius	Epästabiili, erityisesti korkeissa lämpötiloissa ja pitkässä säilytyksessä
Viskositeetti, 40 °C, cST	15 - 35
Tiheys, 15 °C, kg/dm ³	1,10 - 1,30
Leimahduspiste, °C	40 - 110
Jähmettymispiste, °C	9-36
Alempi lämpöarvo, MJ/kg	13 - 18
pH	2 - 3
Tislautuvuus	Ei tislattavissa

Pyrolyysiöljyn kemiallinen epästabiilius on yksi merkittävimmistä lämpölaitoskäyttöä hankaloittavista tekijöistä. Korkeahkon hintansa vuoksi sitä tulisi käyttää raskaan polttoöljyn tilalla huippu- ja varalämpölaitoksissa. Tällöin kulutus voi etenkin lämpiminä talvina olla vähäistä, joten öljyä pitäisi pystyä varastoimaan vuositasolla. Öljyn sisältämät reaktiiviset happea sisältävät yhdisteet kuten orgaaniset hapot, eetterit, esterit, aldehydit ja ketonit polymeroituvat ajan kuluessa ja aiheuttavat viskositeetin nousemista ja faasien erottumista, jotka voivat johtaa esimerkiksi suutinten tukkeutumiseen. Muutokset ovat nopeimmillaan säilytyksen ensimmäisinä viikkoina ja hidastuvat ajan myötä. [26]

Säiliössä täytyy olla sekoitin ja suositeltava varastointilämpötila on alle 25 °C, koska polymeroitumisreaktiot kiihtyvät huomattavasti jo lämpötilan noustessa muutamia kymmeniä asteita huonelämpötilan yläpuolelle. Kun öljyä lämmitetään esimerkiksi pumppausta varten, tulisi lämpöpintojen korkeita lämpötiloja välttää. Alle 50 °C:n öljyn lämpötila on suositeltava pumppaukseen viskositeetin ja polymeroitumisen välttämisen kannalta. [25]

Lisäämällä pyrolyysiöljyn sekaan poolista liuotinta, kuten metanolia, etanolia, isopropanolia tai asetonia voidaan hidastaa faasien erottumista ja parantaa säilyvyyttä. Näistä liuottimista metanoli on todettu tehokkaimmaksi. Liuottimet myös parantavat öljyn pisaroituvuutta ja palamisominaisuuksia. Myös vesipitoisuuden nostaminen hillitsee viskositeetin kasvamista säilytyksessä, mutta toisaalta lisää taipumusta faasien erottumiseen. Faasit erottuvat viimeistään, jos vesipitoisuus nousee yli 30 p- %. Epäorgaaniset kiintoaineet öljyn seassa katalysoivat polymeroitumisreaktioita, ja tämän vuoksi laadukas, vähän kiintoainetta sisältävä polttoaine säilyy pidempään. Erityisesti metsätähteistä peräisin oleva öljy muodostaa pinnalleen helposti kerroksen, jonka poolisuus, vesipitoisuus ja tiheys ovat pienempiä kuin alemmassa kerroksessa. Tässä kerroksessa on myös enemmän kiintoainetta ja sen lämpöarvo on korkeampi. [25]

3.1.2 Pyrolyysiöljyn vaatimukset laitteistolle

Pyrolyysiöljyn happamuus ja polymeroituminen ovat sen merkittävimmät laitemuutostarpeita aiheuttavat ominaisuudet. Muutettaessa polttoöljykattilaa toimimaan pyrolyysiöljyllä, täytyy laitoksesta korvata polttoaineen kanssa kosketuksissa olevat komponentit materiaaleilla, jotka kestävät pyrolyysiöljyn alhaisen pH:n. Näitä osia ovat varastosäiliö, putkisto, pumput, venttiilit, tiivistet, poltin ja osa instrumenteista. Materiaalien on kestettävä myös liuotin- ja pesuaine, esimerkiksi edellä mainitut metanoli, etanoli tai lipeä. [27]

Säiliöksi soveltuu samanlainen pystymallinen varoaltaallinen lieriö tai kyljellään makaava kaksoisvaippainen säiliö kuin fossiilisille öljyille. Pidempiaikaiseen varastointiin säiliöön täytyy asentaa sekoitin. Suomen olosuhteissa on tarve myös eristykselle ja lämmitysmahdollisuudelle, jotta öljy säilyy pumppauskelpoisena myös talvikuukausina. Polttoaineen imupuolelle voidaan asentaa myös imukuumennin. Säiliömateriaaliksi suositellaan haponkestävää tai ruostumatonta terästä (316/316L tai 304/304L). Kustannuksiltaan edullinen vaihtoehto, erityisesti olemassa olevan laitoksen muutostöissä, on pinnoittaa normaalista teräksestä valmistettu säiliö haponkestävällä muovilla. Säiliön puhdistukseen voidaan käyttää lämpimällä vedellä laimennettua etanolia tai lipeää. [27]

Myös putkistossa yleisin ratkaisu on haponkestävä tai ruostumaton teräs. Pienemmille virtaamille soveltuvat myös messinki, kupari tai muovit, mutta näitä voi joutua uusimaan laitoksen eliniän aikana. Koko laitoksen elinkaaren aikana edullisimmaksi

muodostunee kallein mutta kestävin vaihtoehto eli haponkestävä teräs. Putkistoissa täytyy olla saattolämmitysmahdollisuus ja eristys talvikuukausien toiminnan varmistamiseksi. [27]

Pumpuista pyrolyysiöljylle sopivat erityisesti keskipakopumput suurille tilavuusvirroille ja pienille paine-eroille ja syrjäytyspumput pienemmille tilavuusvirroille ja suuremmille paine-eroille. Venttiilityypeistä pyrolyysiöljylle yleisimmin käytetty on palloventtiili. Säättöön käytetään usein kalvoventtiiliä. Istukka- tai luistinventtiileitä ei suositella. Öljyn kanssa kosketuksissa olevien osien on jälleen pumpuissa ja venttiileissä oltava haponkestäviä. Tiivistemateriaaleiksi suositellaan teflonia tai Kalrez®:ia. Myös EP-DM ja silikonikumi (RTI/Can) soveltuvat, mutta niitä saattaa joutua vaihtamaan huomattavasti useammin. [27]

Raskaalle polttoöljylle tarkoitetuista instrumenteista suurin osa sopii myös pyrolyysiöljylle. Tilavuusvirran mittaukseen suositellaan magneettista virtausmittaria ja massavirralla hienoliikkeistä Coriolis -mittaria. Pyrolyysiöljylle soveltuvat samankaltaiset poltintyypit kuin fossiilisille öljyille. Vaihtoehtoina ovat väliainehajoitteinen tai pyöriväkuppinen poltin tai suora injektio tulipesään. Poltto tapahtuu samankaltaisesti kuin raskaalla polttoöljyllä, mutta esilämmityksen tarve on pienempi ja sen tulisi tapahtua vasta polttimessa. Sytytykseen käytetään pilottiliekkiä, jonka polttoaineena käytetään kaasua tai kevyttä polttoöljyä. Liekkivahdiksi sopii samanlainen vahti kuin fossiilisille polttoaineille, mutta se täytyy säätää pyrolyysiöljyn liekille sopivaksi. Poltinvalmistajilta löytyy nykyään tuotteita pyrolyysiöljylle, ja yleensä näillä voidaan polttaa myös kevyttä ja raskasta polttoöljyä, jolloin polttoainevalikoima on laaja. [27]

Muutostyöt muutettaessa POR- tai POK-lämpökeskusta toimimaan myös pyrolyysiöljyllä ovat hyvin samankaltaiset. POR-lämpökeskuksissa on kuitenkin aina valmiina omakäyttöpiiri öljyn lämmitystä varten. Kaikissa kevytöljylämpökeskuksissa tätä ei ole, joten niihin on hankittava lämmönvaihdin ja glykolikierto pyrolyysiöljyn lämmitystä varten, mikä aiheuttaa noin 10 000 – 15 000 €:n lisäinvestoinnin. [28]

3.1.3 Pyrolyysiöljyn ominaisuudet poltettaessa

Pyrolyysiöljyn fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet poikkeavat huomattavasti fossiilisten polttonesteiden ominaisuuksista ja tämä aiheuttaa muutostarpeita ja haasteita tavoiteltaessa luotettavaa ja vähäpäästöistä polttamista. Yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on bioöljyn korkea vesipitoisuus. Se laskee polttoaineen lämpöarvoa ja palamislämpötilaa, vaikeuttaa sytytystä ja pidentää pisaroiden palamisaikaa. Se myös estää öljyn esilämmittämisen korkeisiin lämpötiloihin, koska vesipitoisuuden laskiessa veden haihtuessa viskositeetti kasvaa voimakkaasti. Liian korkea vesipitoisuus myös tekee liekistä epävakaan. Toisaalta korkea vesipitoisuus edesauttaa polttoaineen pisaroitumista ja vähentää termisiä NO_x -päästöjä palamislämpötilan laskiessa. [29]

Bioöljyn seassa oleva kiintoainne aiheuttaa eroosiota pumpuissa, suuttimissa ja muissa poltinlaitteissa. Partikkelit myös päätyvät savukaasujen mukaan lentotuhkaksi, jolloin niiden puhdistaminen aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia verrattuna fossiilisiin öljyihin. Suurin osa partikkeleista on halkaisijaltaan alle 10 µm. [29]

Pyrolyysiöljyn happipitoisuus on tyypillisesti 35 - 40 % kuiva-aineesta. Happea sisältävät yhdisteet aiheuttavat pyrolyysiöljyn poolisuuden. Korkea happipitoisuus laskee öljyn lämpöarvoa ja nostaa siten tarvittavaa polttoainevirtaa. Toisaalta tarvittava palamisilman määrä on huomattavasti alhaisempi verrattuna fossiilisiin öljyihin. Nämä tekijät on otettava huomioon kattilan virtauskenttää suunnitellessa. Pyrolyysiöljykiekin adiabaattinen palamislämpötila, 1400 – 1700 °C, on vain hieman alhaisempi kuin fossiilisilla öljyillä, 1700 – 2000 °C, koska alhainen ilmantarve kompensoi alhaista lämpöarvoa. [29]

Säätöongelmat ja huonolaatuinen pyrolyysiöljy voivat vaikeuttaa palamisen hallintaa ja aiheuttaa kattilan seinien ja lämpöpintojen nopeaa likaantumista. Nämä ongelmat on kuitenkin vältettävissä ammattitaitoisella polton säätämällä ja tasalaatuisella polttoaineella. Likaantumista on mahdollista hallita myös esimerkiksi ajonaikaisella paineilmanuohouksella. Pyrolyysiöljyä poltettaessa kattilan tehosiheyden täytyy olla alhaisempi, koska bioöljyn pisarat palavat hitaammin ja liekin fyysinen koko on siten suurempi. Savon Voiman polttokokeissa kattilan teho laski noin 40 % verrattuna kevyeen polttoöljyyn, mutta järjestelmän säädöt eivät vielä ole optimaaliset, joten hieman suurempiin tehoihin voi olla mahdollista päästä. Pyrolyysiöljy vaatii sytytykseen apuliekin tai sytytyspolttoaineen seostuksen. Sytyttyään se on kuitenkin mahdollista saada palamaan tasaisesti, puhtaasti ja luotettavasti ilman apuliekkiä tai apupolttoainetta. [29]

Pyrolyysiöljyn polton päästömäärät ovat kevyen- ja raskaanpolttoöljyn päästöjen välillä. Hiukkaspäästöjen määrä on tyypillisesti hieman suurempi, mutta SO_x-päästöjä ei juuri synny. Hiukkaspäästöjen määrä riippuu hyvin paljon bioöljyn laadusta, ja suositeltavaa onkin että öljyn kiintoainepitoisuus olisi alle 0,1 p- %. NO_x-päästöt syntyvät alhaisen palamislämpötilan vuoksi lähinnä polttoaineen sisältämästä tyydestä, ja niiden määrään on siis helpointa vaikuttaa polttoaineen tuotantovaiheessa. CO-päästöt voivat olla hieman fossiilisia öljyjä suuremmat, mutta tyypillisesti raja-arvojen alapuolella. Oikein säädetyin pyrolyysiöljykattilan pitäisi läpäistä nykyiset päästörajat laitokselle asennetun multisyklonin avulla, mutta mittaustietoa Savon Voiman omalta laitokselta ei vielä ole. [29]

3.1.4 Kokemuksia pyrolyysiöljyn koepoltoista

Pyrolyysiöljyllä on toteutettu kesän 2015 aikana kaksi koepolttoa Savon Voiman 12,8 MW:n öljylämpökeskuksella, joka on varustettu myös pyrolyysiöljyn käytön mahdollistavilla laitteilla. Suurimpana haasteena molemmilla kerroilla on ollut

pyrolyysiöljyn pumppaaminen. Toisessa koetilanteessa itse palamisen tutkimiseen ei päästy pumppautuvuusongelmien vuoksi. Aloittaessa pumppausta pyrolyysiöljy on ollut hankalaa saada liikkumaan säiliöstä. Kun öljy on saatu liikkeelle, se on aluksi tukkinut polttoainesuodattimen nopeasti pyrolyysiöljystä erottuneella siirappimaisella korkean viskositeetin nesteellä. On vielä epäselvää, missä järjestelmän osassa tämä paksumpi neste on syntynyt, sillä valtaosa säiliön sisällöstä on kuitenkin säilynyt viskositeetiltaan normaalina. Pyrolyysiöljyä säilytetään vaakatasoon sijoitetussa sylinterimäisessä kahdella sekoittimella varustetussa säiliössä. On mahdollista, että sekoituksesta huolimatta säiliöön syntyy kohtia, joissa öljy ei juuri virtaa ja siitä erottuu suuren molekyylipainon yhdisteitä edellä kuvatulaiseksi suuremman viskositeetin omaavaksi faasikseen. On myös mahdollista, että jossain kohtaa järjestelmää öljy on päässyt lämpenemään liiaksi, mikä on nopeuttanut seinämällä olleen öljyn polymeroitumisreaktioita. [28]

Kun pyrolyysiöljy on saatu polttimelle, tulokset ovat olleet lupaavia vaikka polttamisessa on ollut myös haasteita. Ongelmia on aiheuttanut sytyttäminen ja liekin suuri koko. Erityisesti suurilla tehoilla ajettaessa kookas liekki on kerryttänyt kattilan seinämille palamatonta öljyä. Poltin siis vaatii muutoksia ja säätöä syttymisen varmistamiseksi ja oikeanlaisen liekin muodon saavuttamiseksi. Lisäksi pumppaus, esilämmitys ja suodatinyksikkö vaativat muutoksia, jotta pumppautuvuus voidaan varmistaa. Olisi myös suositeltavaa saada lämpökeskukselle varastosäiliöön esimerkiksi etanolia tai propanolia, jotta laitteet ja putkistot voidaan puhdistaa pyrolyysiöljystä käytön jälkeen eikä tukkeutumia pääse syntymään. Ensimmäisen polttokokeilun jälkeen putkiston huuhtomiseen käytettiin kevyttä polttoöljyä, mutta on mahdollista, että tämä ei riitä, koska pyrolyysiöljy ei liukene kevyeen polttoöljyyn. Lisäksi liuottimella voitaisiin helpottaa pumppausta ongelmatilanteissa. [28]

3.2 Pellettipolttimet

Pelletit ovat puusta puristettuja sylinterimäisiä rakeita, joiden halkaisija on 8-12 mm ja pituus 10–30 mm. Raaka-aineina valmistuksessa käytetään esimerkiksi teollisuuden puutähteitä, kuorta ja metsähaketta. Pellettien irtotiheys on 600–750 kg/i-m³, kiintotiheys 1100–1500 kg/m³, kosteus 10–15 % ja lämpöarvo 14–17,7 MJ/kg. Joutuessaan kosketuksiin veden kanssa puupelletit kostuvat, turpoavat ja hajoavat, joten ne on säilytettävä sateelta suojassa. Tyypillisesti lämpökeskuskokoluokassa tämä toteutetaan pystysiilossa. [30]

Pellettien polttotekniset ominaisuudet ovat paremmat kuin esimerkiksi hakkeella, joten laiteinvestoinnit ovat edullisemmat kuin huonolaatuisemmilla polttoaineilla. Toisaalta hinta energiayksikköä kohden on lähes kaksinkertainen hakkeeseen verrattuna. Hyvälaatuisen polttoaineen johdosta pellettipolttimien minimikuorma on pieni, alle 10 % nimellistehosta ja ne käynnistyvät nopeasti. Poltintyypistä riippuen käynnistys

kestää kymmenistä minuuteista muutamiin tunteihin. Pelletin arinapoltto on hyvin koeteltua tekniikkaa ja siten laiteinvestointina suhteellisen edullinen ja käyttövarma.

Arinapoltin on myös mahdollista asentaa jo olemassa olevaan öljylämpökeskukseen öljypolttimen tilalle. Tulitorvi-tuliputki kattilan eteen asennetaan etupesä, ja tämä liitetään varsinaiseen pellettipolttimeen. Pellettipolttimella on mahdollista tuottaa noin 2/3 öljypolttimen huipputehosta. Muutos on mahdollista toteuttaa edullisemmin kuin vastaavan uuden pellettilämpökeskuksen hankinta, mikäli lämpökeskusrakennuksessa on tilaa pellettipolttimelle ja oheislaitteille, ja esimerkiksi olemassa olevaa piippua voidaan hyödyntää. Kuvassa 13 on esitetty Suur Savon Sähkön Artermiltä tilaama etupesällä varustettu pellettipoltin, joka on asennettu aikaisemmin öljykäyttöiseen tulitorvi-tuliputkikattilaan. Konvektio-osa rajautuu pois kuvasta vasemmalla puolella.



Kuva 13. Tulitorvi-tuliputkikattilan eteen asennettu pellettipoltin ja etupesä

Kuvasta nähdään, että muutostyöt vaativat tilaa, mikä on otettava huomioon muutoksia suunnitellessa. Kuvassa 14 on esitelty pellettipolttimen arina sisältäpäin. Kuvassa 13 arina on oikealla ja sen ympärillä kulkevat primääri- ja sekundääri-ilmaputket.

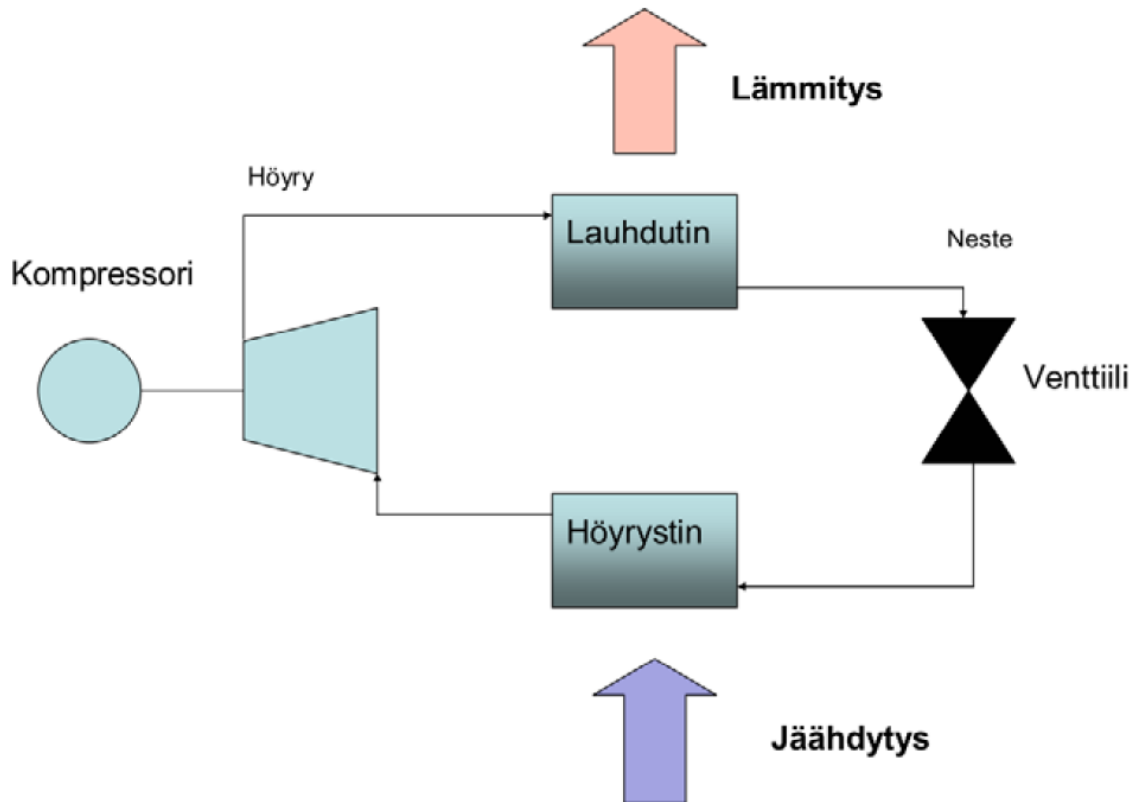


Kuva 14. Pellettipolttimen arina [31]

Pelletin pölypoltto on varsin uutta tekniikkaa Suomessa ja käytössä olevia laitoksia on vasta muutamia. Savon Voimalla on Lapinlahdella vuonna 2012 valmistunut 7 MW:n pölypellettilämpökeskus. Sen etuja ovat erittäin nopea käynnistyvyys ja säädettävyys, joissa se vertautuu öljykattilan arvoihin. Pelletit jauhetaan pölyksi vasaramyllyssä ja pöly poltetaan tulitorvi-tuliputkikattilassa, jonne se syötetään kantoilman avulla. Poltin sytytetään nestekaasulla, jonka jälkeen aluksi polttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä. Polttoaineen vaihto tapahtuu lisäämällä vähitellen sen polttoaineen osuutta johon halutaan siirtyä. Vaihto kestää kuormitusasteesta riippuen 30–100 s. Lämpökeskusta on mahdollista ajaa myös ”pätkällä” pienen kuorman aikaan, jolloin poltin on ajoittain pois päältä ja kytkeytyy taas päälle, kun menoveden lämpötila laskee raja-arvon alapuolelle. Tällöin sytytykseen käytettävää kevyttä polttoöljyä kuluu kuitenkin jopa 1/3 polttoaineesta.

3.3 Lämpöpumput

Lämpöpumpulla tarkoitetaan laitetta, joka siirtää lämpöä alhaisemmasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan ja käyttää tähän prosessiin korkeampi-arvoista energiaa, kuten sähköä. Tässä työssä keskitytään mekaanisiin lämpöpumppuihin, koska niiden ominaisuudet ovat sopivimmat kaukolämmön tuotantoon. Kuvassa 15 on esitetty mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate.



Kuva 15. Mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate [32]

Mekaanisessa lämpöpumpussa kylmäaine höyrystyy höyrystimellä, jolloin se sitoo itseensä lämpöä. Sitten höyry pumpataan sähköenergian avulla korkeampaan paineeseen, jolloin sen lämpötila nousee. Korkeamman lämpötilansa takia höyry pystyy luovuttamaan lämpöenergiansa korkeammassa kuin höyrystimen lämpötilassa. Lauhduttimella höyry luovuttaa lämpöenergiansa ja lauhtuu nesteeksi. Tämän jälkeen se paisuu paisuntaventtiilissä, jolloin sen lämpötila jälleen laskee ja se voi ottaa vastaan lämpöä höyrystimen lämpötilassa.

Lämpöpumpun lämpökerroin (COP) kertoo, montako yksikköä lämpöä pumppu tuottaa yhtä kulutettua ulkoista energiayksikköä kohden, eli

$$COP = \frac{Q_{ulos}}{W_{sisään}}, \quad (1)$$

jossa COP on lämpökerroin, Q_{ulos} lämpöpumpusta saatava lämpöenergia [J] ja $W_{sisään}$ lämpöpumpun käyttämiseksi tehty työ [J].

Ideaaliselle Carnot -lämpöpumppukierrolle COP -arvo saadaan yhtälöllä

$$COP = \frac{T_{kuuma}}{T_{kuuma} - T_{kylmä}}, \quad (2)$$

jossa T_{kuuma} on kylmäaineen lämpötila lauhduttimessa [K] ja $T_{\text{kylmä}}$ kylmäaineen lämpötila höyrystimessä [K].

Yhtälöstä nähdään, että parhaimmillaan lämpöpumput ovat, kun tarvittava lämpötilankorotus on pieni. Käytännössä todellisilla lämpöpumpuilla saavutetaan noin 65–75 % ideaalisesta COP-arvosta. Mekaanisten lämpöpumppujen investointikustannukset ovat tyypillisesti 0,5–1 M€/MW. [32]

Lämpöpumput soveltuvat suurten investointikustannustensa vuoksi huonosti vara- ja huipputehon lähteeksi. Nykyaikaiset lämpöpumput voivat kuitenkin olla hyvinkin kannattavia perus- ja keskikuorman tuotantoon. Esimerkiksi Mäntsälä voitti EHPA:n (European heat pump association) Heat pump city of the year 2015 – palkinnon Calefa Oy:n lämpöpumpuilla, jotka tuottavat 4 MW kaukolämpöä Yandexin serverikeskuksesta. Toteutuksessa lämpöä pumpataan 40 °C ilmasta kuudella lämpöpumpulla kaukolämpöverkkoon. Pumput pystyvät tuottamaan kaukolämpöä yli 80 °C lämpötilassa COP-arvolla 4. Tällöin tuotetulle lämmölle tulee sähkön hinnalla 90 €/MWh hintaa 22,5 €/MWh. Tällä hinnalla muuttuvat kustannukset ovat kilpailukykyiset kiinteän polttoaineen lämpökeskusten kanssa. Investointikustannus rakennuksineen oli noin 2 000 000€. [33]

Lämpöpumppuratkaisua suunniteltaessa on otettava huomioon myös menoveden lämpötilan primaustarve talvikaudella. Lämpöpumppujen COP laskee huomattavasti tuotetun lämmön lämpötilan noustessa, joten niillä tuotetun lämmön korkein lämpötilataso tällä hetkellä on noin 80 °C. Tämä on liian alhainen menolämpötila kaukolämpövedelle kylminä kuukausina, joten menoveden lämpötilaa täytyy tällöin nostaa jollain vaihtoehtoisella tuotantotavalla. Tämä on otettava huomioon kannattavuutta laskettaessa.

Pohdittaessa uusia investointeja perus- ja keskikuormalaitoksiin tulisi siis vertailla myös lämpöpumppuja, mikäli kaukolämpöverkon läheisyydessä on teollisuutta jolta sopivaa hukkalämpöä voisi olla saatavissa. Tutkimisen arvoisia lämmönlähteitä ovat esimerkiksi Olvin tehdas Iisalmessa ja Valion tehdas Lapinlahdella.

3.3.1 Lämpöpumpun kannattavuuteen vaikuttavat tekijät

Hyödynnettävän matalalämpötilaisen lämmönlähteen teho, ajallinen käytös ja vuosienenergia ovat tärkeimpiä kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Hyödyntämisen kannattavuus paranee luonnollisesti hukkalämpötehon noustessa. Lämpöä voi kuitenkin syntyä jaksottaisesti esimerkiksi vuodenaikojen, työaikamuotojen tai prosessien syklien mukaisesti, jolloin sen hyödyntäminen hankaloituu. Lämpö voidaan varastoida lämpöakkuun, mutta investointikustannukset kasvavat ja hyödyntäminen voi muuttua kannattamattomaksi. [34]

Lämmönlähteen olomuoto, puhtaus ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti sen hyödynnettävyyteen. Yleisesti helpommin hyödynnettävissä ovat lämmönlähteet, joissa on paljon energiaa tilavuusyksikköä kohti, eli esimerkiksi nesteet tai paineiset höyryt. Tällöin laitteiston dimensiot ovat pienemmät ja aineen siirtoon tarvitaan pienempi teho. Lämpövirrat ovat usein likaisia tai epähomogeenisia, jolloin lämmön hyödyntäminen vaatii esimerkiksi suodatusta ennen lämmön talteen ottavaa laitteistoa. Yleensä tämä on teknisesti toteutettavissa, mutta käyttö- ja investointikustannukset ovat korkeammat. Kemialliset ominaisuudet, kuten korkea tai alhainen pH tai myrkyllisyys voivat johtaa kalliiden tai huonosti lämpöä johtavien materiaalien käyttöön. [34]

Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuden kannalta oleellisia ovat luonnollisesti myös ylijäämälämmön, sähkön ja vaihtoehtoisen lämmön tuotantotavan hinnat. Yleensä ylijäämälämpö on ilmaista tai hyvin halpaa. Kirjoitushetken alhaisilla sähkön hinnoilla nestemäisten ja kaasumaisten fossiilisten polttoaineiden korvaaminen lämpöpumpulla on usein kannattavaa, mutta riippuu tietenkin korvattavasta energiamäärästä. Jos pumpulla korvataan edullista kiinteää polttoainetta, kuten haketta, turvetta tai kivihiiltä, kannattavuus on hyvin tapauskohtaista ja vaatii yleensä pitkät huipun käyttöajat. [34]

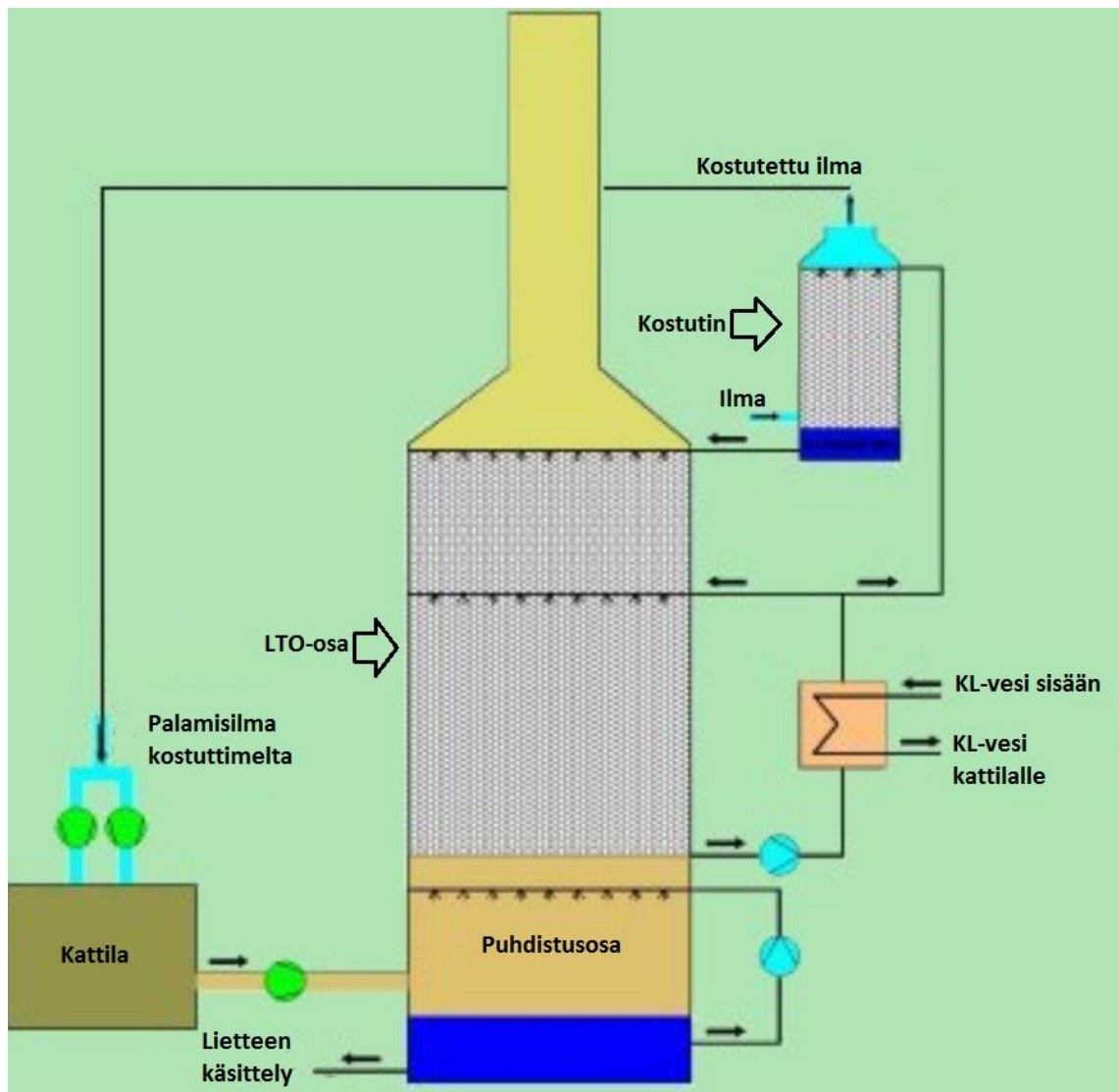
3.4 LTO -savukaasupesuri

Savukaasupesureilla tarkoitetaan niin sanottuja märkäpesureita, joiden kehityksessä oli alun perin tavoitteena hiukkaspäästöjen vähentäminen. Nykyään painopiste on kehitystyössä siirtynyt enemmän savukaasujen hukkalämmön talteenottoon. Kuitenkin pesuri toimii myös nykyään tehokkaana tapana läpäistä tiukimmatkin hiukkaspäästöasetukset. Lämmöntalteenotto(LTO)-savukaasupesurin toiminta perustuu savukaasujen loppulämpötilan laskemiseen kastepisteen alapuolelle, jolloin savukaasuissa olevaa vesihöyryä lauhtuu ja vapautuva lämpö voidaan hyödyntää kaukolämpöveden lämmittämiseen ennen lämpökeskuksen varsinaista kaukolämpövaihdinta. Se siis vähentää suoraan laitoksen polttoaineen kulutusta ja lisää laitoksesta saatavaa tehoa, jolloin myös huippukuormakattiloiden käyttö vähenee. LTO-pesurin avulla lämpölaitoksen laskennallinen hyötysuhde voi nousta yli 100 %:n, mikäli laskentaan käytetään polttoaineen alemmaa lämpöarvoa. Alempi lämpöarvo ilmoittaa polttoaineen poltossa vapautuvan energiamäärän, kun polttoaineen sisältämä ja palamisprosessissa syntynyt vesi ovat prosessin jälkeen vesihöyryinä. Mikäli tätä vesihöyryä lauhdutetaan ja saadaan siten hyödyksi sen sisältämä lämpö, voidaan saada prosessin laskennalliseksi hyötysuhteeksi yli 100 %.

Ennen pesuria savukaasut puhdistetaan tyypillisesti esimerkiksi multisyklonilla tai sähkösuotimella, jotta ne voidaan tarvittaessa johtaa piippuun myös pesuri ohittaen. Itse pesuri jakautuu kahteen vaiheeseen: puhdistusosaan ja lämmön talteenotto-osaan. Puhdistusosassa savukaasut virtaavat pesurissa ylöspäin ja pesuvesi ruiskutetaan savukaasun joukkoon vastavirtaan eli alaspäin. Pesuosan alaosasta pesuvesi pumpataan

takaisin yläosan suuttimille. Alaosan lietettä joko pumpataan määrääjoin pois pesurista puhdistettavaksi tai liete saostetaan saostusaltaassa ennen kiertoon palauttamista. Pesuosassa savukaasuista poistuu suurin osa jäljellä olevista hiukkasepäpuhtauksista, jotka likaisivat lämmön talteenotto-osan lämmönsiirtimiä. Savukaasujen lämpötila myös laskee yleensä kastepistelämpötilaan. [35]

Myös lämmön talteenotto-osassa savukaasut virtaavat ylöspäin ja LTO-vesi ruiskutetaan niiden sekaan vastavirtaan. LTO-osassa on muovi- tai metallikappaleista koostuva täytekappalekerros, joka lisää lämmönsiirtopinta-alaa ja siten tehostaa lämmönsiirtoa. Savukaasut jäähtyvät joten niistä lauhtuu kosteutta, koska lämpötila on alle kastepistelämpötilan. LTO-vesi vastaanottaa tämän faasimuutoslämmön, ja luovuttaa sen kaukolämpöveiteen lämmönvaihtimella ennen kuin se ruiskutetaan takaisin savukaasun sekaan. Kuvassa 16 on esitelty palamisilman kostuttimella varustetun savukaasupesurin toimintaperiaate. [35]

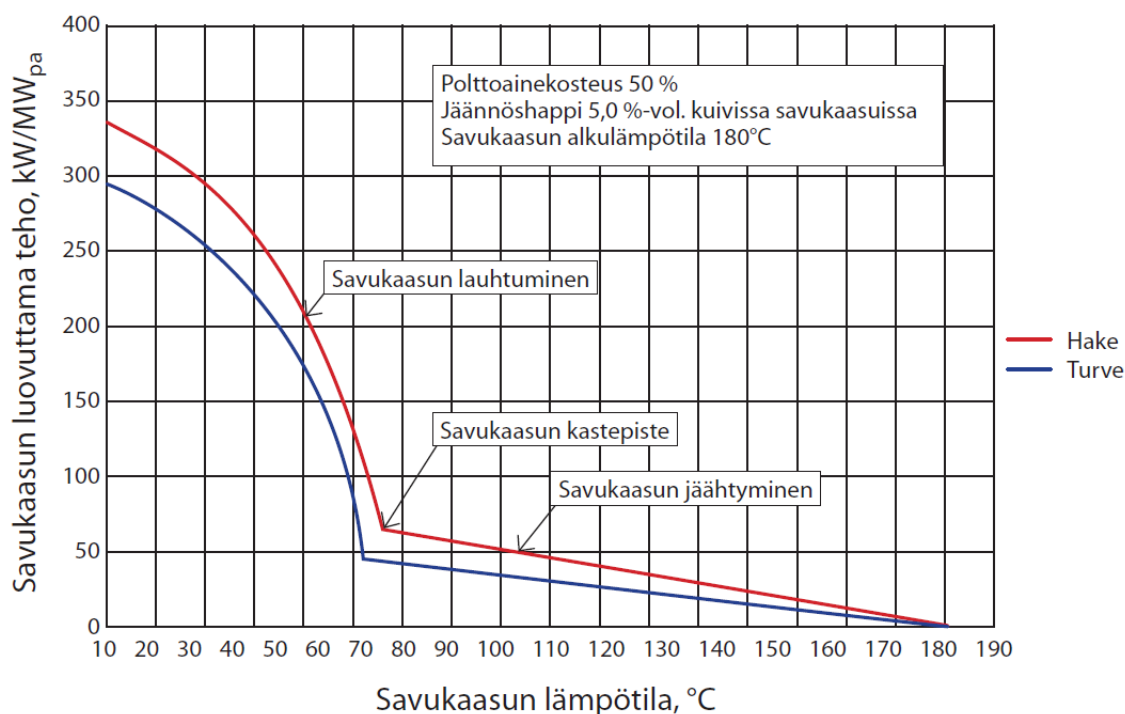


Kuva 16. LTO pesurin rakenne. Muokattu lähteestä [36]

LTO-savukaasupesurin tehokkuus riippuu hyvin voimakkaasti kaukolämpöveden paluulämpötilasta, koska se määrää LTO-veden alimman lämpötilan. Mitä alempaan lämpötilaan paluuvesi pystyy jäädyttämään LTO-veden, sitä alemmas saadaan laskettua savukaasujen loppulämpötila ja suurempi osa savukaasujen kosteudesta saadaan lauhtumaan lämpöä luovuttaen. Mikäli paluuvien lämpötila on korkea ja kastepistettä ei saavuteta, pesurin LTO-kyky jää hyvin pieneksi. [35]

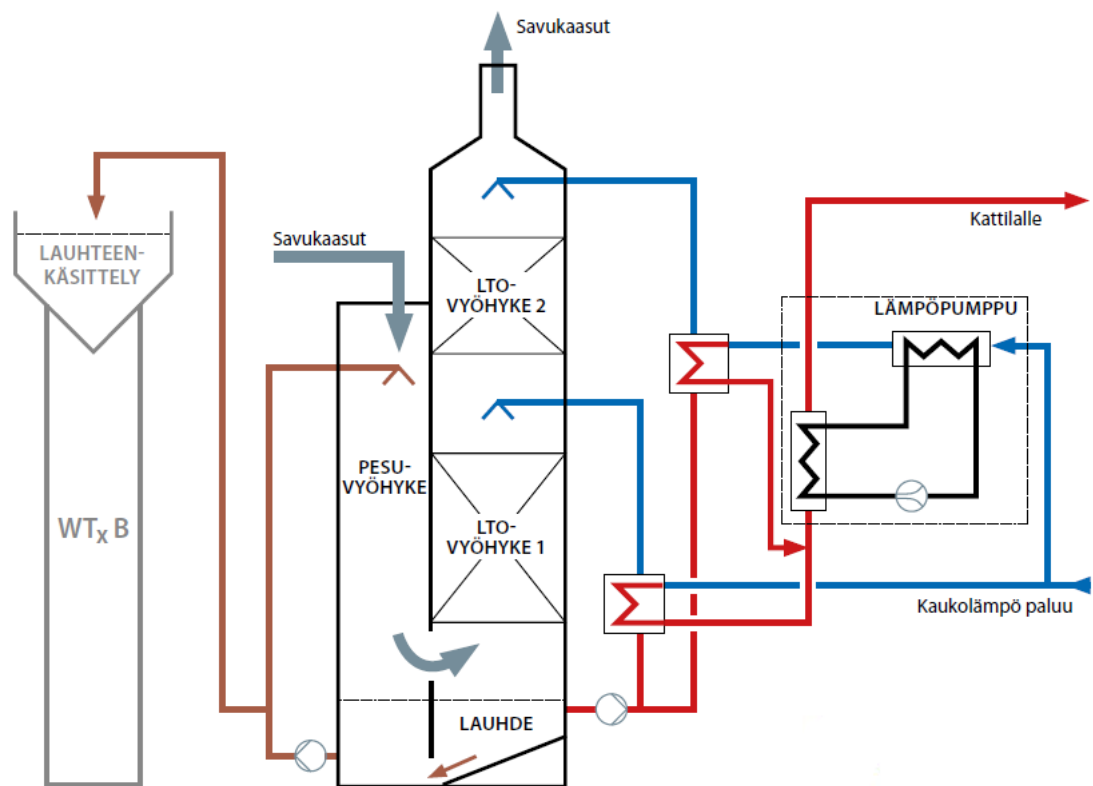
Toinen merkittävä LTO-kykyyn vaikuttava tekijä on polttoaineen kosteus. Kostealla polttoaineella kastepiste saavutetaan korkeammassa lämpötilassa ja siten saadaan lauhtumaan enemmän kosteutta määrättyllä paluuvien lämpötilalla. Yleensä LTO-pesureilla saadaan talteen otettua 10 - 30 % kattilatehosta, riippuen polttoaineen kosteudesta ja paluuvien lämpötilasta. [35]

Kuivilla polttoaineilla ja kuumilla paluuvien lämpötiloilla lämmön talteenottoa on mahdollista tehostaa palamisilman kostuttimella. Kostutuksessa palamisilmaan höyrystetään vettä ja sitä lämmitetään matalalämpötilaisella energialla, joka muuten jäisi hyödyntämättä. Savukaasun kastepistelämpötila nousee palamisilman kostutuksen vuoksi. Tämä aiheuttaa sen, että kostuttimessa palamisilmaan siirretty lämpö on otettavissa talteen korkeammalla lämpötilatasolla ja se voidaan siten siirtää kaukolämpöveen. Kuvassa 17 on esitetty kostean savukaasun luovuttama lämpöenergia polttoainetehoa kohti kosteudeltaan 50 % hakkeelle ja turpeelle. [37]



Kuva 17. Kostean savukaasun luovuttama lämpöenergia polttoainetehoa kohti lauhtutuslämpötilan funktiona [35]

Nykyään markkinoille on tullut myös lämpöpumpulla varustettuja LTO-savukaasupesureita. Niissä osa kaukolämpöverkon paluuedestä johdetaan lämpöpumppuun, jossa paluuedestä otetaan lämpöä ja pumpataan se pesurin jälkeiseen kattilaan menevään veteen. Tällöin pesurin LTO-vesi saadaan jäähdytettyä alemmalle lämpötilatasolle ja pesurin luovuttamaa lämpötehoa nostettua. Tästä on hyötyä erityisesti kovilla pakkasilla, jolloin lämpökeskukset pyrkivät käyttämään kuivempia polttoaineita ja kaukolämmön paluuvesi on tyypillisesti korkeammassa lämpötilassa. Näissä olosuhteissa perinteinen pesuri ei välttämättä saavuta kastepistelämpötilaa ja siten tuota tehoa. Kuvassa 18 on esitetty Caligo Industrian lämpöpumpulla varustetun pesurin yksinkertaistettu toimintakaavio. [38]



Kuva 18. Lämpöpumppukytkenällä varustettu savukaasupesuri [38]

3.5 Aurinkolämpö

Vuoden 2013 loppuun mennessä aurinkolämpöä oli maailmassa asennettuna yhteensä $374,7 \text{ GW}_{\text{th}}$, josta suurin osa Kiinassa ($262,3 \text{ GW}_{\text{th}}$) ja Euroopassa ($44,1 \text{ GW}_{\text{th}}$). [39] Myös Suomessa kiinnostus aurinkolämpöä kohtaan on viimeaikoina kasvanut, johtuen tiukentuneista rakentamisen energiamääräyksistä, energiatehokkuusdirektiivistä ja EU:n uusiutuvan energiantavoitteista vuodelle 2020. Euroopassa aurinkolämmön tuotanto on lähes yksinomaan kotitalouksien tuotantoa omaan käyttöön. Keskitettyjen ratkaisujen

osuus oli vuonna 2010 alle 1 %. Tästä poikkeuksena on Tanska, jossa keskitettyjen ratkaisujen osuus on yli 30 %. [40]

Aurinkolämmön yhdistäminen kaukolämmön tuotantoon on haasteellista seuraavista syistä: [41]

- Aurinkolämmöllä tuotetun lämmön lämpötilataso on alhainen, ja tuotettu lämpömäärä laskee tuotantolämpötilan noustessa. Aurinkolämpö siis vaatii yleensä lämpötilan priimauksen jollain muulla tuotantomuodolla. Uusilla teknologioilla, kuten tyhjiöputkikeräimillä lämpöä voidaan tosin tuottaa myös kaukolämmön vaatimissa lämpötiloissa.
- Aurinkolämmön tuotanto painottuu kesäaikaan, ja se vaihtelee huomattavasti eri päivien ja päivän ja yön välillä.
- Vakiodut ratkaisut puuttuvat, joten hinta on korkeampi ja tietoa optimaalisista kokonaisratkaisuista Suomen olosuhteisiin ei ole.

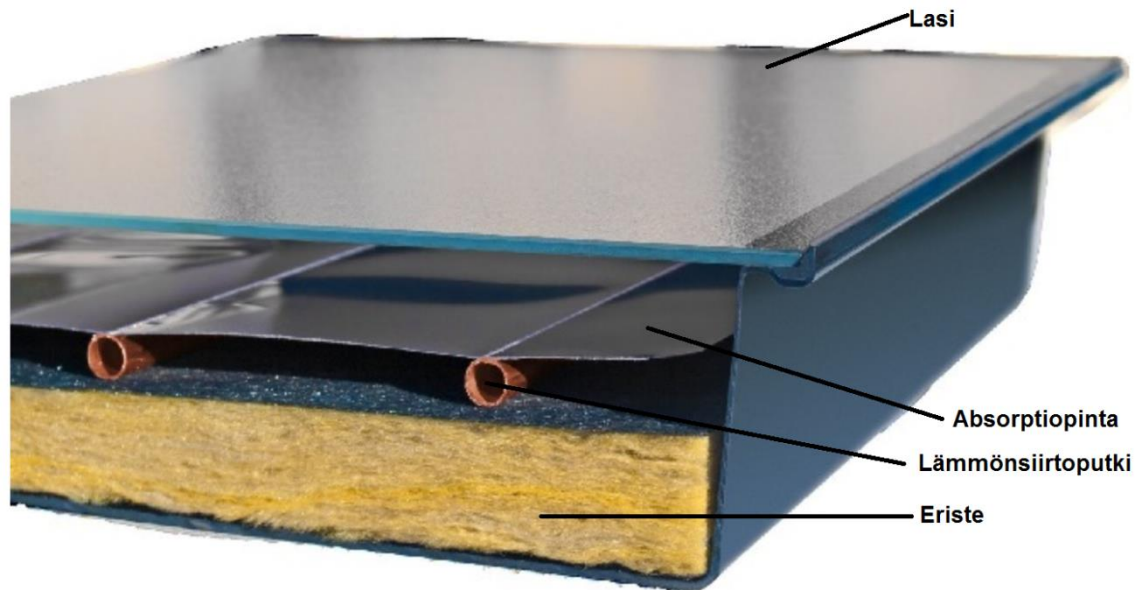
Savon Voimalla on Tahkovuorella Nipasen kaukolämpöverkossa pellettilämpökeskuksen yhteydessä 12 m² tasokeräimiä, joilla kerätään kokemuksia aurinkolämmöstä kaukolämmön tuotannossa.

3.5.1 Aurinkolämmön keräintekniikat

Aurinkolämpökeräimet voidaan jakaa keskittäviin ja ei-keskittäviin ratkaisuihin. Tässä työssä ei käsitellä keskittäviä keräimiä, koska niiden ominaisuudet eivät sovellu Suomen oloihin erityisen hyvin. Keskittävien keräimien mekaaniset rakenteet ovat ongelmallisia Suomen talviolosuhteissa. Lisäksi suoran säteilyn osuus on maantieteellisen sijainnin takia pienempi, joten keskittävien järjestelmien hyöty jää pienemmäksi. [41]

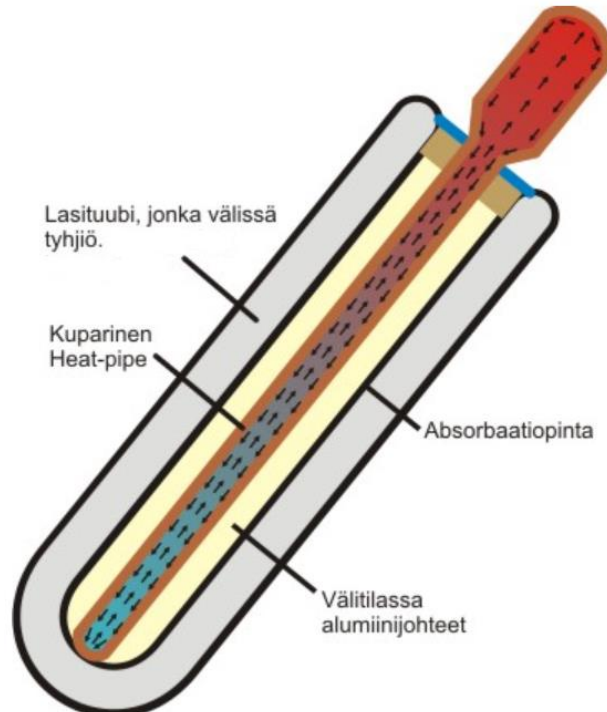
Edullisimpia ei-keskittäviä keräimiä ovat tasokeräimet. Ne ovat yleisiä erityisesti Euroopassa. Niissä valo absorboidaan keräinpintaan, joka on suojattu lasilla. Lämmönsiirtoputket kulkevat keräinpinnan alla ja niissä käytetään yleensä lämmönsiirtoaineena vesi-glykoliseosta. Absorptiopinta on suljettu lämpöeristettyyn laatikkoon. Tyypillinen toimintalämpötila on 30–70 °C. [40]

Kuvassa 19 on esitelty tasokeräimen rakenne.



Kuva 19. Tasokeräimen rakenne. Muokattu lähteestä [42]

Tyhjiöputkikeräimet ovat suosittuja Kiinassa, jossa niitä on suurin osa asennetusta kapasiteetista. Koska Kiinan markkinat edustivat vuonna 2013 noin 70 % maailman aurinkokeräinmarkkinoista, suurin osa maailman uuskapasiteetista on tekniikaltaan tyhjiöputkitekniikkaa. [41] Kuvassa 20 on esitelty tyhjiöputkikeräimen rakenne.



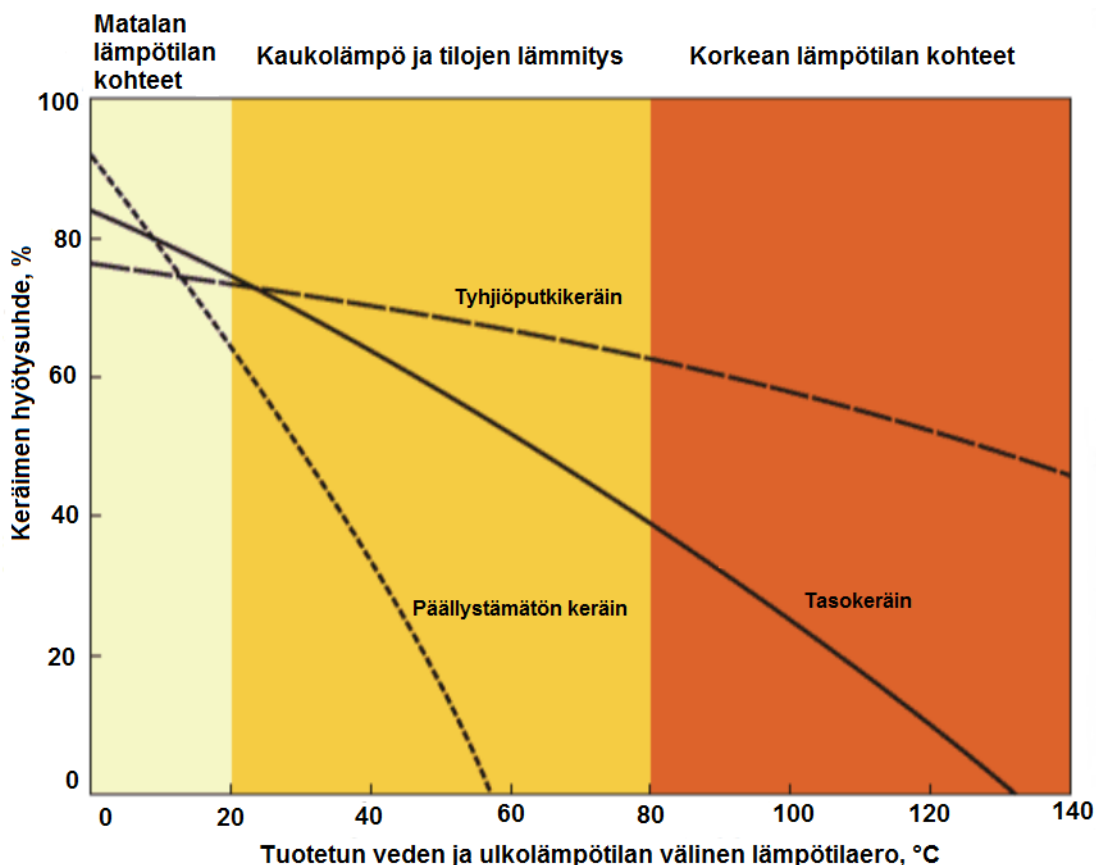
Kuva 20. Tyhjiöputkikeräimen rakenne [43]

Tyhjiöputkikeräimessä absorptiopinta on putken pinnalla. Putkessa kulkeva lämmönsiirtoneste höyrystyy absorboidessaan auringon säteilyä, nousee putken yläosaan, luovuttaa lämpönsä lämmönvaihtimella ja lauhde valuu takaisin putken alaosaan höyrystymään. Absorptioputki on suljettu suurempaan lasiputkeen josta on poistettu ilma. Tämä tyhjiöputki eristää absorptioputken tehokkaasti, joten tyhjiöputkikeräimillä päästään korkeampiin lämpötiloihin kuin tasokeräimillä, ja niiden tyypillinen toimintalämpötila on 70 - 120 °C. [40] Tyhjiöputkikeräinten heikkous on niiden mekaaninen kestävyys. Esimerkiksi raesade voi vahingoittaa keräimiä. [41]

3.5.2 Aurinkolämpö kaukolämpöjärjestelmässä

Aurinkolämmön taloudellinen hyöty aiheutuu kaukolämmön muuttuvien tuotantokustannusten alentumisesta. Olemassa olevan tuotannon kiinteisiin kustannuksiin aurinkokeräimillä ei ole vaikutusta, sillä ne eivät tuota lämpöä talvella ja siten korvaa muuta kapasiteettia, ellei aurinkolämmön tarpeisiin ole riittävän suurta ja toimintavarmaa kausivarastointia. Aurinkolämmön tuotanto vaihtelee tunti- ja päivätasolla huomattavasti, joten erityisesti kiinteän polttoaineen lämpölaitosten kanssa yhdessä toimiva aurinkolämpö vaatii lämpöakun tasoittamaan tuotantoa, sillä KPA-laitosten tehon muutosnopeus on rajallinen. [40]

Kaukolämpöverkon avulla aurinkolämpö voidaan siirtää tuottajilta kuluttajille ja siten hyödyntää kaikki tuotettu lämpö. Hajautetussa tuotannossa lämpö voidaan siirtää kaukolämmön meno- tai paluulinjaan. Aurinkokeräinten tuotannon kannalta menolinjaan kytkeminen on epädullista, koska korkea lämpötilataso laskee keräimen tuotantoa. Kaukolämpöverkon kannalta paluulinjaan kytkentä on kuitenkin ongelmallista, mikäli verkostossa on lämmöntuotantolaitos jossa on sähkön tuotantoa tai savukaasupesuri. Korkeampi paluuveden lämpötila laskee pesurista saatavaa hyötyä ja CHP-laitoksessa korkeampi paluuveden lämpötila laskee tuotetun sähköenergian määrää. Kuvassa 21 on esitetty eri keräintyyppien hyötysuhteita tuotetun veden lämpötilan ja ulkolämpötilan eron funktiona. [40]



Kuva 21. Eri keräintyyppien hyötysuhteita tuotetun veden ja ympäristön välisen lämpötilaeron funktiona. Muokattu lähteestä [44]

Tyhjiöputkikeräimillä tuotannon pudotus ei ole yhtä suurta lämpötilaeron kasvaessa, joten jos aurinkolämpö halutaan syöttää verkkoon suhteellisen korkeassa lämpötilassa (>50 °C), on syytä harkita niiden käyttöä. [41]

Pöyryn selvityksessä saatiin keskitetylle aurinkolämmölle tuotantokustannuksiksi 0,5 ha keräinalalla 67 €/MWh ja 5 ha keräinalalla 47 €/MWh 5 % korkokannalla ja 20 vuoden käyttöiällä. Tuotantokustannus on hyvin voimakkaasti riippuvainen investointikustannuksista. Mikäli investoinnille saisi 30 % tuen, voisi Etelä-Suomessa rannikolla päästä noin tasolle 30 €/MWh. [40]

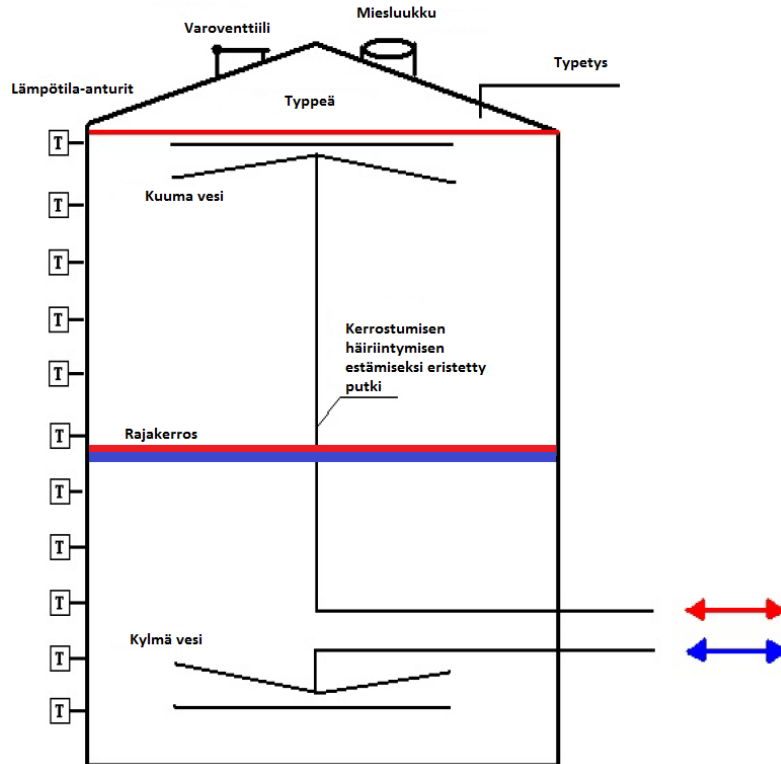
Aurinkolämpö ei siis vaikuta kannattavalta investoinnilta öljyn käytön vähentämiseksi. Pöyryn selvityksessä investoinnin tuottovaatimukset olivat tässä työssä käytettyjä pienemmät ja silti tuotantokustannus oli edullisimmillaankin lähes pellettilämpökeskuksen muuttuvien kustannusten suuruusluokkaa. Lisäksi aurinkolämpöjärjestelmä ei tuota lainkaan talven kylmimpinä kuukausina, joten tälle ajalle täytyisi vielä investoida korvaavaa tuotantoa. Vaikka potentiaalia öljyn korvaamiseen aurinkolämmöllä ei juuri ole, suunniteltaessa uusia peruskuormalaitosinvestointeja kannattaa aurinkolämmön integroimista perinteisen

tuotannon yhteyteen harkita. Aurinkolämmön käyttöönotolla voidaan vähentää kiinteiden polttoaineiden hinnanmuutoksista aiheutuvaa riskiä.

3.6 Lämpöakku

Lämpöakulla tarkoitetaan laitetta, johon voidaan varastoida lämpöenergiaa ja purkaa sitä myöhempana ajankohtana. Varastointi on mahdollista toteuttaa varastoimalla lämpö faasimuutokseen, kemiallisten reaktioiden avulla tai tuntuvana lämpönä esimerkiksi suureen vesisäiliöön, jossa vesi toimii varastoivana massana sekä lämpöenergian kuljettajana. Faasimuutokseen perustuvissa menetelmissä yleisin varastointiaine on vesihöyry. Suoloja käytetään, kun on tarve muille kuin veden faasimuutoksen lämpötilatasoille. Suolojen ongelmina ovat kiteytymisen osittainen palautumattomuus ja korroosio-ongelmat. Myös parafiineja ja rasvahappoja on käytetty faasimuutokseen perustuvissa lämpöakuissa. Kemialliseen reaktioon perustuvat varastot ovat vielä kehitysvaiheessa. Niihin on mahdollista varastoida huomattavasti enemmän lämpöä kuin veteen, mutta reaktioiden toistettavuus on ongelmallista. [5]

Käytännössä ainut suuren kokoluokan keskitetty menetelmä lämmön varastoimiseen on tuntevan lämmön varastointi, eli varastointi väliaineen lämpötilanmuutokseen. Lyhytaikaiseen, eli päivä- ja viikkotason lämmönvarastointiin sopii parhaiten säiliö jossa lämpövarastona toimii nestemäinen vesi. Kuvassa 22 on esitelty tällaisen lämpöakun toimintaperiaate. [5]



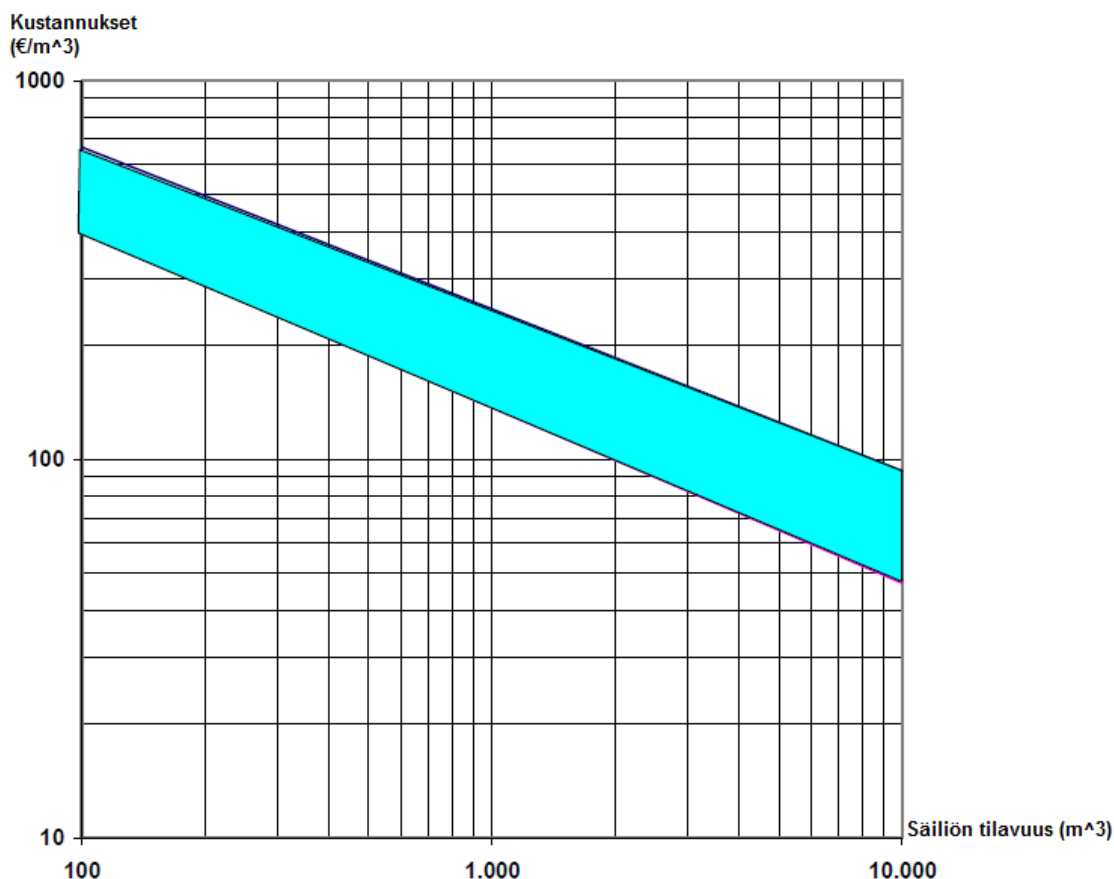
Kuva 22. Sylinterin muotoisen, veden tuntuvaan lämmön varastointiin perustuvan lämpöakun rakenne. Muokattu lähteestä [45]

Tällöin tarvittavan säiliötilavuuden voi laskea yhtälöstä 3,

$$V = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot \eta_V \cdot \eta_Q}, \quad (3)$$

jossa V on säiliön tilavuus [m^3], Q varastoitava lämpömäärä [J], c_p veden ominaislämpökapasiteetti $4182[\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}]$, ΔT akun tulo- ja menoveden lämpötilaero [K], ρ veden tiheys varastoinnin lämpötilassa (90°C) $965 [\text{kg}/\text{m}^3]$, η_V akun tilavuushyötysuhde [%] ja η_Q varastoinnin hyötysuhde [%].

Säiliötä, jossa veden maksimilämpötila on 100°C , sanotaan lämminvesivaraajaksi. Kuumavesivaraajassa lämpötilataso on yli 100°C , joten säiliön täytyy olla paineistettu. Lämminvesivaraajan vettä täytyy priimata talvikuukausina, jotta sen lämpötilataso saadaan tarpeeksi korkeaksi verkkoon syöttämistä varten. Säiliöön muodostuu kuuman ja viileän veden tiheyserojen vaikutuksesta rajakerros, eli kuuma vesi kerrostuu pinnalle ja viileä pohjaan. Suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon vedenjakajat, jotta eri lämpöiset vedet eivät sekoitu kun varastoa ladataan ja puretaan. Kuvassa 23 on esitelty erikokoisten terässäiliöiden rakentamiskustannuksia säiliön tilavuuden funktiona.



Kuva 23. Pystymallisten sylinterimäisten lämpöakkujen investointikustannukset tilavuuden funktiona [45]

Lähtökohtaisesti lämpöä varastoidaan silloin kun lämmön hinta on alhainen ja/tai kun lämpöä tuotetaan liikaa. Lämpöakku voi tilapäisesti toimia vastapainelaitoksen keinotekoisena kuluttajana, jolloin vastapainesähkön tuotantoa voidaan lisätä. Varastoitua lämpöä puretaan varastosta, kun lämmöntarve on suuri ja/tai lämmön hinta on suuri. Kaukolämmön kysynnässä voidaan erottaa neljän tyyppistä vaihtelua, joiden tasaamiseen lämpöakku on mahdollista hyödyntää: Käyttöveden päivittäinen kulutuksen vaihtelu, rakennusten sisälämpötilan säädön päivä- ja viikkokohtainen vaihtelu, sään aiheuttama vaihtelu sekä vuodenaikojen aiheuttama pitkäaikaisvaihtelu. Myös sähkön kysynnässä on vaihtelua, mutta sähkön ja lämmön kulutusvaihtelut ovat osittain toisistaan riippumattomia. [5]

Lämpöakku tarjoaa kaukolämmöntuotannossa seuraavia hyötyjä [5]:

- Vastapainelaitokset voivat säätää sähköntuotantoaan lämmöntuotannosta riippumattomasti
- Polttoainekustannuksia voidaan alentaa lataamalla varastoa edullisella polttoaineella pienen kulutuksen aikaan, jolloin vältetään lämmön tuotantoa kalliimmilla polttoaineilla korkeamman kulutuksen aikaan

- Lämpövarastoa voidaan hyödyntää suunniteltujen ja suunnittelemattomien alasajojen aikana
- Varasto voi toimia vesireservinä verkon vauriotapauksissa ja paineistetut säiliöt myös verkon paisuntasäiliönä

Lämpöakun merkittävin haitta kaukolämpöjärjestelmälle on lämpöhäviöiden lisääntyminen, kun lämmintä vettä varastoidaan säiliöön sen sijaan, että lämpöenergia siirrettäisiin suoraan asiakkaille. Kausivarastoinnissa varastoinnin hyötysuhde on luokkaa 40 – 70 %, mutta lyhytaikaisvarastoinnissa lämpöhäviöt ovat vain muutaman prosentin luokkaa. Taulukkoon 2 on listattu Suomeen vuoteen 2006 mennessä rakennetut kaukolämpöakut. [5]

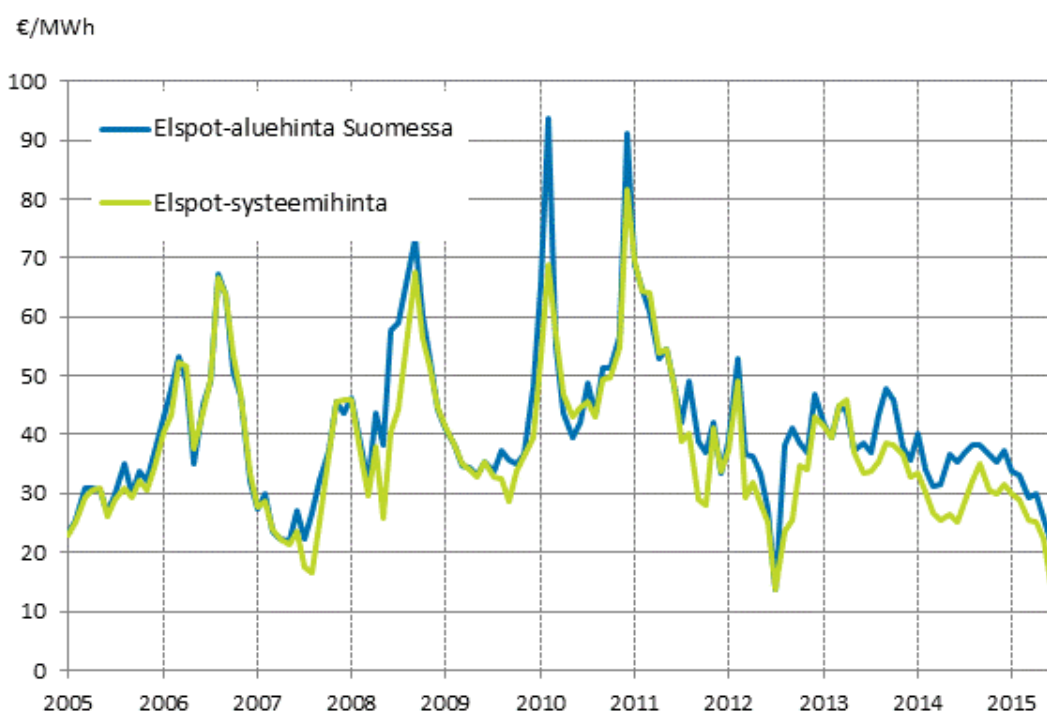
Taulukko 2: Suomeen rakennettuja lämpöakkuja [5]

Sijainti	Tilavuus (m³)	Kapasiteetti (MWh)	Maksimi - teho (MW)	Pääpolttoaine	Käyttöönotto- vuosi
Espoo, Otaniemi	500	20	10	Kaasu	1974
Oulu	15000	800	80	Turve	1985
Oulu (kallio)	190000	10000	8	Turve	1996
Lahti	10000	450	40	Hiili	1985
Lahti	200	9	1	Kaasu	1989
Naantali	15000	690	82	Hiili	1985
Helsinki, Salmisaari	2*10000	1000	130	Hiili	1987
Helsinki, Vuosaari	26000	1400	130	Kaasu	1997
Saarijärvi	350	21	3	Turve	1988
Kouvola	10000	420	72	Kaasu	1988
Hämeenlinna	10000	320	50	Hiili	1988
Hyvinkää	10000	350	50	Kaasu	1988
Vantaa	20000	900	50	Hiili	1990
Rovaniemi	10000	450	30	Turve	1998
Kokkola	3200	185	50	Hake, puru	2001
Turku	6000	300	60	Hiili, puu	2003
Yhteensä	346250	17315	918		

Oulun kalliosäiliötä lukuun ottamatta kaikki säiliöt ovat terästä. Otaniemen ja Saarijärven säiliöt ovat paineistettuja. Oulun kalliovarasto sekä Helsingin Salmisaaren ja Hämeenlinnan säiliöt on kytketty lämmönsiirtimellä, muut on toteutettu suoralla kytkennällä, eli niissä kiertää sama vesi kuin kaukolämpöverkossa. Saarijärveä lukuun ottamatta kaikki varastot on rakennettu kaukolämpöverkkoihin, joissa on CHP-tuotantoa. [46]

3.7 Sähkökattilat

Sähkön hinta on viime aikoina painunut pohjoismaisessa sähköpörssissä ennätysellisen alas. Tämä lisää sähkövastuksilla tuotetun lämmön houkuttelevuutta erityisesti pienissä kaukolämpöverkoissa. Viime vuosina sähköverkkoon on syöttötariffin ansiosta liitetty runsaasti tuulivoimaa, joka laskee sähkön pörssihintaa tuulisina ajankohtina. Lisäksi hintaa on painanut pidentynyt taloustaantuma, joka on vähentänyt teollisuuden sähkön kulutusta. Kuvassa 24 on esitetty sähkön hintakehitys viimeisen kymmenen vuoden ajalta pohjoismaisessa sähköpörssissä sekä Suomen aluehinta.



Kuva 24. Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvohinnat [47]

Pörssisähkön hintaa tulevaisuudessa voi arvioida forwardien hintojen perusteella. Ne ovat sopimuksia tulevaisuudessa tehtävästä kaupasta, ja niiden hinta heijastelee parasta tämänhetkistä arviota tulevaisuuden hinnoista. NASDAQ OMX Commodities -vuosisopimukset ennustavat tällä hetkellä sähkön hintaan vain pientä nousua. Niiden mukaan esimerkiksi vuonna 2025 Nord Pool Spotin keskihinta olisi noin 30 €/MWh.

[48] Suomen aluehinnat ovat viime ajat olleet kuitenkin usein systeemihintaa huomattavasti korkeammat. Vuonna 2016 Ruotsin ja Liettuan välille valmistuva 700 MW:n siirtojohto ja tämän hetken arvion mukaan vuonna 2018 – 2019 valmistuva Olkiluoto 3 tulevat kuitenkin pienentämään Suomen aluehintaeroa. [49] Näyttäisi siis, että sähkön hinta Suomessa tulee pysymään alhaisena tulevana vuosikymmenenä.

Sähkökäyttöisen lämmityksen tekee houkuttelevaksi sen alhaiset investointikustannukset ja käytön helppous. Sähkölämmityskattilat ovat käytännössä huoltovapaita, ja niitä pystyy säätämään helposti ja hyötysuhteen kärsimättä 0 -100 % tehoille. Sähkölämmityksen investointikustannukset aiheutuvat lämmityskattilasta, sähköverkon liittymismaksusta ja liittymisjohdon rakentamiskustannuksista. Lämmitysenergian hinta puolestaan aiheutuu sähköenergian pörssihinnasta, siirtomaksusta ja sähköverosta. Siirtomaksun suuruus talvikuukausina on huomattavasti suurempi kuin kesällä. Lisäksi Savon Voiman verkkoalueella on voimassa tehotariffi, joka laskutetaan 1.11 - 31.3 välisenä aikana kuukausittain suurimman toteutuneen tuntikohtaisen keskitehon mukaan. Myös sähkön pörssihinnat ovat talvella keskimäärin korkeammat. Nämä tekijät nostavat huomattavasti sähkölämmityksen kustannuksia talvikuukausina, joten sähkölämmitys tuskin on kilpailukykyistä huipputehon tuotannossa. Erittäin harvoin käytettäviksi varatehonlähteiksi ne sen sijaan soveltuvat, ja vähentävät näin ollen tarvetta investoida muihin varatehona käytettäviin lämpökeskuksiin.

4. TARKASTELUUN VALITUT KAUKOLÄMPÖVERKOT

Tässä kappaleessa esitellään Iisalmen, Kiuruveden ja Rautalammin kaukolämpöverkot, ja näille verkoille saatuja tuloksia hyödynnetään Savon Voimalla tulevaisuudessa myös muiden samankaltaisten verkkojen öljyn kulutuksen vähentämisessä. Iisalmen kaukolämpöverkko on Savon Voima verkoista suuritehoisin. Kiuruvesi edustaa kooltaan keskikokoista verkkoa. Rautalammin verkko on tyypillinen pieni kaukolämpöverkko.

4.1 Iisalmi

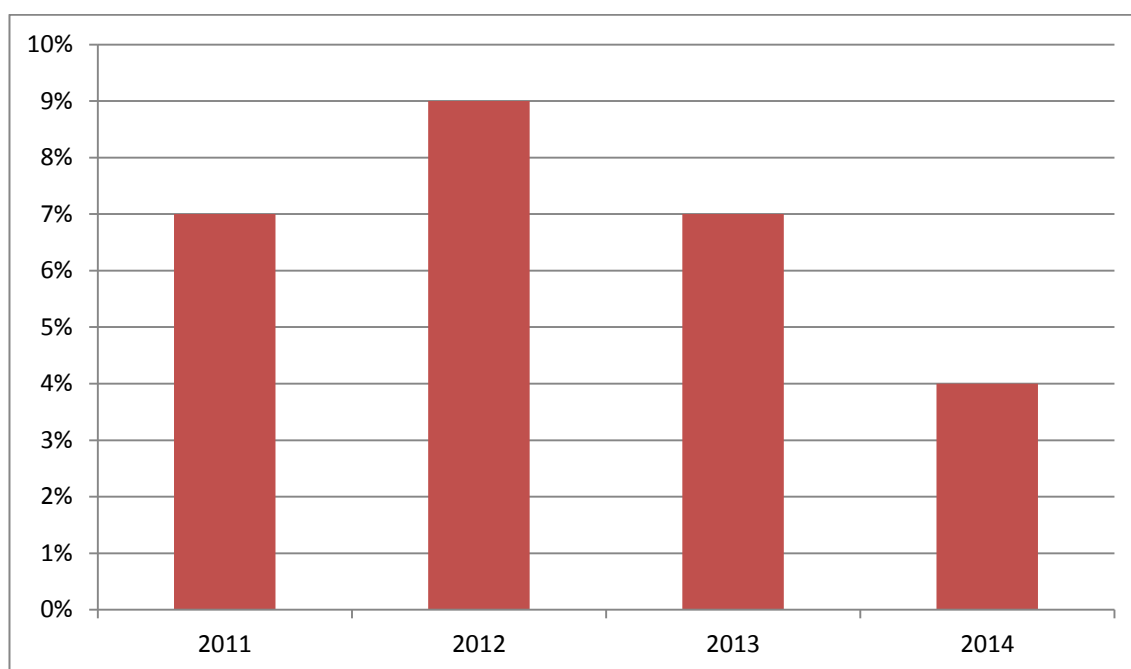
Iisalmi valittiin tarkasteluun, koska se on toinen Savon Voiman kaukolämpöpaikkakunnista, joissa on sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Siellä öljyn kulutus on myös ollut tähän asti suurempaa kuin toisella yhteistuotantopaikkakunnalla eli Pieksämäellä. Taulukkoon 3 on listattu Iisalmen kaukolämpöverkkoon kytketyt tuotantolaitokset.

Taulukko 3. Iisalmen tuotantolaitokset

Nimi	Tyyppi	Polttoaine	Lämpöteho (MW)	Valmistumisvuosi
VL2	Kerrosleiju	Turve ja hake	30 + sähköteho 15 MW	2002
LK67	Kerrosleiju	Turve ja hake	15	1983
VL2:n pesuri	LTO-pesuri	-	noin 20 % VL2:n tehosta	2015
LK96 PYR/POK lämpökeskus	Tulitorvi-tuliputki	POK/PYR	POK 12,9, PYR 8	2012
7 kpl öljylämpökeskuksia	Tulitorvi-tuliputki	POR/POK	68	1981 - 2013

Syksyllä 2015 voimalaitoksen yhteyteen valmistuu mitoitusteholtaan 8 MW:n LTO-savukaasupesuri, joka tulee pudottamaan öljyn osuutta huomattavasti. Yksi Iisalmen verkon öljylämpökeskuksista on varustettu pyrolyysiöljyn käyttöön soveltuvilla laitteistoilla. Lämpökeskuksella on kesän 2015 aikana suoritettu koepolttoja, joissa on tutkittu pyrolyysiöljyn toimivuutta vara- ja huipputehon tuotannossa. VL2:lla ja LK67:lla on yhteinen polttoaineen vastaanotto, seula ja murskain, joka aiheuttaa kesäisin noin kahden viikon yhtäaikaisen seisakin molemmille laitoksille. Tällöin lämpökuorma on tähän asti tuotettu raskaalla polttoöljyllä, mutta kappaleessa 6.7 on esitetty toimenpide-ehdotus lämpökeskuksen käynnissä pitämiseksi polttoaineen vastaanoton huollon ajaksi. Polttoaineenaan KPA-laitokset käyttävät turvetta ja puuperäisiä polttoaineita, noin suhteella 2/3 turvetta ja 1/3 haketta ja teollisuuden puutähteitä.

Kuvassa 25 on esitetty öljyn osuus käytetyistä polttoaineista Iisalmissa vuosina 2011 - 2014.



Kuva 25. Öljyn osuus polttoaineiden kokonaiskulutuksesta Iisalmen kaukolämpöverkossa 2011 - 2014

Erityisesti vuoden 2014 alhainen öljyn käyttö on osittain leudon talven ansiota. Öljyn kulutus on vuoden 2015 syyskuun alkuun mennessä ollut 4 % polttoaineista. Ennen pian valmistuvaa LTO -pesuria KPA-laitosten teho on riittänyt noin ulkolämpötilaan -10 °C asti. Pesurin valmistuttua kiinteän polttoaineen laitosten tehot riittävät ulkolämpötilaan -15 °C. Mikäli pyrolyysiöljykäyttöinen lämpökeskus saadaan toimimaan luotettavasti miehittämättömänä, sen tuottama noin 8 MW:n teho saa biopolttoainekapasiteetin riittämään ulkolämpötilaan -21 °C. Tällöin öljyn osuus polttoaineista tulee putoamaan

alle prosenttiin polttoaineista, mikäli KPA-laitoksille ei tapahdu suunnittelemattomia alasajoja talven aikana, ja polttoaineen vastaanoton huollon aikainen öljyn kulutus saadaan poistettua.

4.2 Kiuruvesi

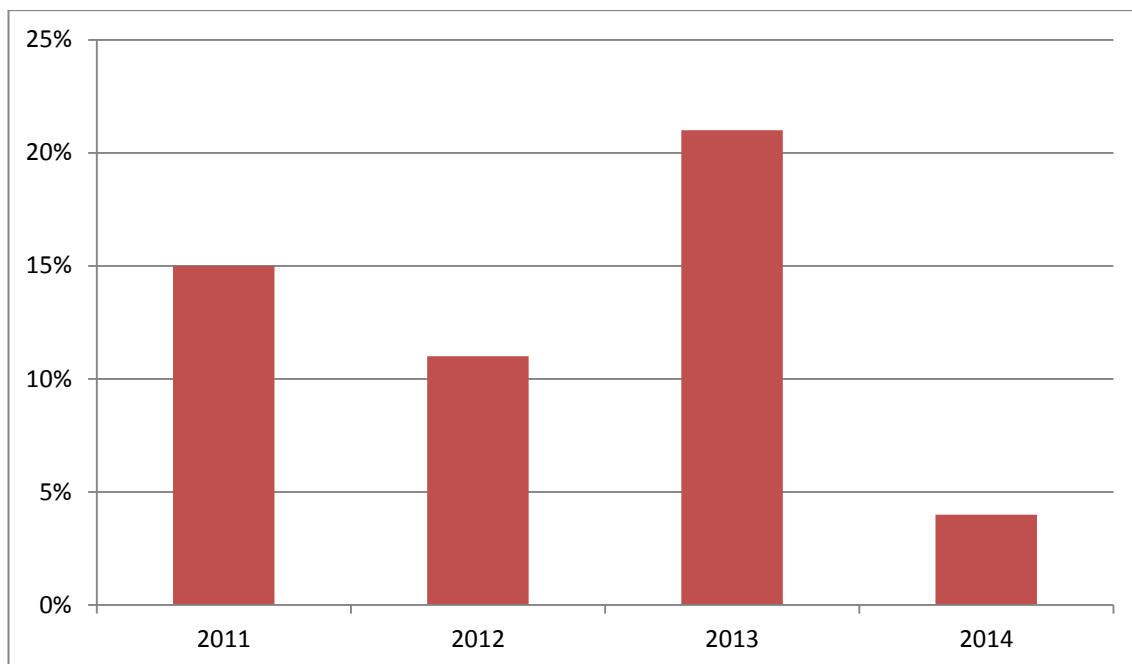
Kiuruveden kaukolämpöverkko valittiin tarkasteluun, koska öljyn osuus on ollut siellä viime vuosina vielä kohtalaisen korkea, eikä uusia investointeja KPA-kapasiteettiin ole lähivuosina toteutettu lukuun ottamatta vuonna 2013 toteutettua muutosprojektia, jossa aikaisemmin sähköä tuottaneen voimalaitoksen kattila muutettiin höyrykattilasta kuumavesikattilaksi ja sähkön tuotannosta luovuttiin. Näin laitoksen kaukolämpöteho kasvoi noin 25 %. Ennen muutostöitä laitoksella tuotettiin sähköä höyrymoottorilla. Taulukkoon 4 on listattu Kiuruveden kaukolämpöverkkoon kytketyt tuotantolaitokset.

Taulukko 4. Kiuruveden tuotantolaitokset

Nimi	Tyyppi	Polttoaine	Lämpöteho (MW)	Valmistumisvuosi
VL4	Kekoarina	Hake ja teollisuuden puutähteet	8	1999
LK66	Kekoarina	Hake ja teollisuuden puutähteet	3,5	1994
3 kpl öljylämpökeskuksia	Tulitorvi-tuliputki	POR/POK	17	1977 - 1986

KPA-kattilat käyttävät polttoaineenaan sahojen sivutuotteita, eli kuorta ja sahanpurua sekä metsähaketta. Suurin osa sivutuotteista saadaan KPA-laitosten vieressä sijaitsevalta sahalta. KPA-lämpökeskusten yhteisteho riittää noin ulkolämpötilaan -10 °C asti. Huippu- ja varatehona verkossa on 3 kpl öljykattiloita yhteisteholtaan 17 MW.

Kuvassa 26 on esitetty öljyn osuus Kiuruveden kaukolämpöverkossa käytetyistä polttoaineista vuosina 2011 - 2014.



Kuva 26. Öljyn osuus polttoaineiden kokonaiskulutuksesta Kiuruveden kaukolämpöverkossa 2011 - 2014

Kuvasta nähdään vuonna 2013 toteutetun pitkittyneen muutosprojektin aiheuttama korkeampi öljyn kulutus. Vuoden 2014 alhainen kulutus on lämpimän talven ja voimalaitoksen lämpötehonkorotuksen ansiota. Ennen muutostöitä KPA-kattiloiden teho riitti vain ulkolämpötilaan 0 °C asti.

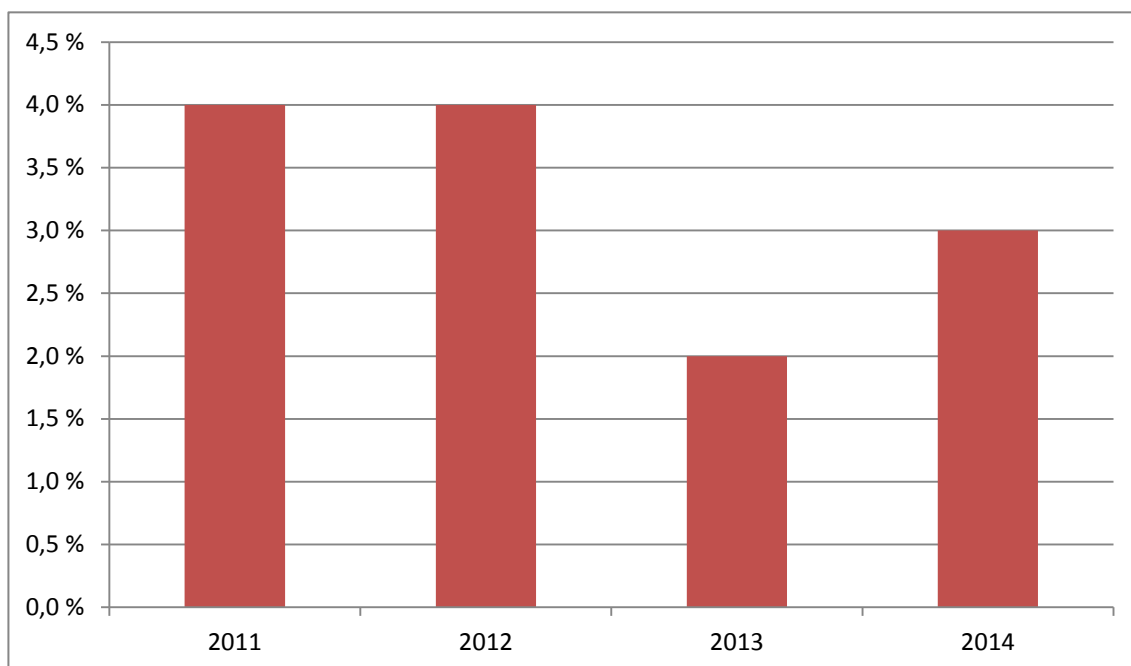
4.3 Rautalampi

Rautalammin kaukolämpöverkko valittiin tarkasteluun koska se edustaa pientä kaukolämpöverkkoa, jossa on yksi kiinteän polttoaineen lämpökeskus peruskuormalle ja tämän lisäksi vara- ja huipputeholle ainoastaan öljykäyttöistä kapasiteettia. Taulukkoon 5 on listattu Rautalammin kaukolämpöverkkoon kytketyt tuotantolaitokset.

Taulukko 5. Rautalammin tuotantolaitokset

Nimi	Tyyppi	Polttoaine	Lämpöteho (MW)	Valmistumisvuosi
LK40	Viistoarina	Hake	2,5	2008
2 kpl öljylämpökeskuksia	Tulitorvi- tuliputki	Kevyt polttoöljy	4,5	1980 ja 2008

LK40:n teho riittää noin ulkolämpötilaan $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ jonka jälkeen tarvittava teho tuotetaan kevytöljylämpökeskuksilla. Kuvassa 27 on esitetty öljyn osuus käytetyistä polttoaineista vuosina 2011 - 2014.



Kuva 27. Öljyn osuus polttoaineiden kokonaiskulutuksesta Rautalammin kaukolämpöverkossa 2011 - 2014

Kuvasta nähdään, että öljyn kulutus Rautalammin kaukolämpöverkossa on ollut viime vuosina hyvin alhaista oikein mitoitettun KPA-lämpökeskuksen ansiosta. Suurin osa öljyn kulutuksesta aiheutuu kesäisin KPA-lämpökeskuksen noin kahden viikon pituisen revision aikana.

5. KANNATTAVUUSLASKELMAT

Tässä kappaleessa arvioidaan lupaavimpien teknisten ratkaisuiden kannattavuutta Rautalammin, Kiuruveden ja Iisalmen kaukolämpöverkoissa. Lupaavimmiksi tekniikoiksi katsottiin lämpöakku, pyrolyysiöljy, arina- ja pölypellettipolttimet, LTO-savukaasupesuri, lämpöpumput ja suora sähkön käyttö. Lämmön varastoinnin kustannuksia lämpöakulle arvioitiin valitsemalla akulle tietty varastointikapasiteetti ja vuosittaiset lataus-purkauskerrat. Akun toimintaa ei siis mallinnettu mihinkään tarkastelupaikkakunnista, vaan tarkasteltiin vain varastoinnin kustannuksia tietyllä oletetulla käyttömäärällä.

Kiuruvedelle ja Rautalamminle mallinnettiin erikokoisia arinapellettilämpökeskuksia, pyrolyysiöljylämpökeskusta ja LTO-savukaasupesuria. Iisalmeen mallinnettiin erikokoisia arinapellettilämpökeskuksia sekä pölypellettilämpökeskusta. Lämmön talteenoton kannattavuutta Kiuruveden lämpölaitoksen viereiseltä sahalla selvitettiin lämpöpumpputoimittajalta saatujen hinta-arvioiden ja kuivaamotoimittajan näkemysten perusteella. Suoran sähkölämmityksen kannattavuutta tarkasteltiin Rautalamminle KPA-laitoksen revision aikaisen tehon tuottamiseen.

5.1 Investointilaskentamenetelmät

Eri kokoluokkien ja laitostyyppien kannattavuuksia vertailtiin suoralla korottomalla takaisinmaksuajalla, jonka perusteella valittiin tarkempaan tarkasteluun kannattavin vaihtoehto. Takaisinmaksuaika saadaan yhtälöllä

$$\frac{A}{k} = n, \quad (4)$$

jossa A on hankintameno, k vuotuiset nettotuotot ja n koroton takaisinmaksuaika vuosina. Kannattavin investointi on se, jonka takaisinmaksuaika on lyhyin.

Lupaavimpien vaihtoehtojen kannattavuuden reunaehdoja tarkasteltiin annuiteettimenetelmällä, jossa investointikustannus jaetaan investoinnin pitoajalle vuosittaisiksi tasaeriksi. Laskentaan käytettiin 7 % korkokantaa ja 15 vuoden pitoaikaa. Annuiteettitekijä saadaan yhtälöllä

$$c_{n/i} = i \cdot \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (5)$$

jossa n on pitoaika vuosina ja i laskentakorkokanta. Investoinnin vuosittainen kustannus saadaan kertomalla hankintakustannus annuiteettitekijällä. Investointi on kannattava,

mikäli vuotuiset säästöt tai tuotot ovat pääomakustannuksia suuremmat. Laitoksien jäännösarvona käytettiin nollaa. Kannattamattomien investointien tapauksessa tarkasteltiin, millä korvattavan polttoöljyn tai kiinteän polttoaineen hinnalla säästöt nousisivat pääomakulujen suuruiseksi.

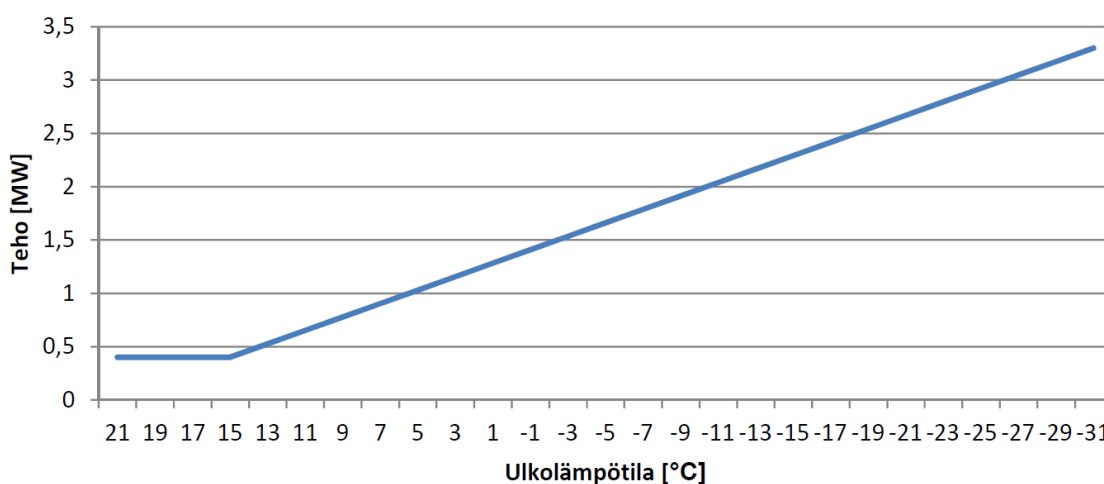
Osalle tekniikoista laskettiin myös korollinen takaisinmaksuaika. Jos säästöt tai tuotot pysyvät vakiona, se saadaan laskettua yhtälöllä

$$\frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n * i} * k = A, \quad (6)$$

jossa n on korollinen takaisinmaksuaika vuosina, i laskentakorkokanta, k vuotuiset nettotuotot ja A investoinnin hankintameno.

5.2 Kaukolämpöverkkojen tehontarpeen mallinnus

Savon Voimalla on vasta aloitettu laitoskohtaisten tehotietojen kerääminen, joten tilastotietoa eri laitosten verkkoon syöttämistä tehoista on saatavilla heikosti ja vain lyhyeltä aikaväliltä. Tämän vuoksi tarkasteluun valittujen verkkojen jokaisen laitoksen tuntikohtaiset tehot määritettiin ulkolämpötilatilastojen ja verkkojen säätökäyrän perusteella Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla. Ulkolämpötiloina käytettiin 4 vuoden tilastotietoa Rissalan mittausasemalta vuosilta 2011 - 2014. Kuvassa 28 on esitetty Rautalammin säätökäyrä.



Kuva 28. Rautalammin säätökäyrä

Tehontarve määritettiin kahdessa osassa: Ulkolämpötilan ollessa yli 16 °C tehontarve oletettiin vakioksi. Lämpötilan laskiessa alle 16 °C:een tehontarpeen oletettiin kasvavan lineaarisesti. Käyrän kulmakerroin määritettiin jokaiselle kaukolämpöverkolle tehdyn säätökäyrän ja käyttöpäälliköiltä saatujen tietojen perusteella. Verkkojen todelliset tehontarpeet seuraavat kuvan mukaista käyrää varsin hyvin. Menetelmän heikkona puolena on, että lämpimän käyttöveden kulutuksesta ja esimerkiksi toimistojen

lämmityksen käynnistymisestä aiheutuva aamujen kulutuspiikki ja lämpimän käyttöveden kulutuksesta aiheutuva iltapiikki jäävät ottamatta huomioon. Näiden lisäksi kulutuspiikkejä aiheuttavat teollisuuslaitosten prosessit, joita menetelmä ei myöskään huomioi. Joskus tällaiset kulutuspiikit aiheuttavat öljyn kulutusta, ja tämä öljyn kulutus jää menetelmässä havaitsematta. Yleensä öljyä tarvitaan piikkejä varten kuitenkin vain, kun kiinteän polttoaineen laitoksen teho ei riitä piikin huipputehon tuottamiseen. Lisäksi verkkoa lataamalla tällaisinaan hetkinä öljytehoa ei välttämättä tarvita, joten piikkien vaikutus oletetaan pieneksi. Laskennan lopuksi mallin antamia polttoaineiden kulutuksia verrattiin tilastoituihin kulutuksiin ja tarvittaessa käyrän kulmakerrointa säädettiin tämän mukaan.

Verkon tehontarpeen ja tuotantolaitosten ajojärjestyksen perusteella voitiin määrittää neljälle kokonaiselle vuodelle tuntikohtaiset tehot käytössä oleville tuotantolaitoksille ja verkkoon mallinnetuille öljyä korvaaville vaihtoehtoisille. Näiden tuntikohtaisten tehojen perusteella laskettiin vuosittainen korvatus öljyn määrä vertailtaville tuotantomuodoille. Kannattavuuslaskelmissa käytettiin korvatus öljyn määränä näiden neljän vuoden keskiarvoa.

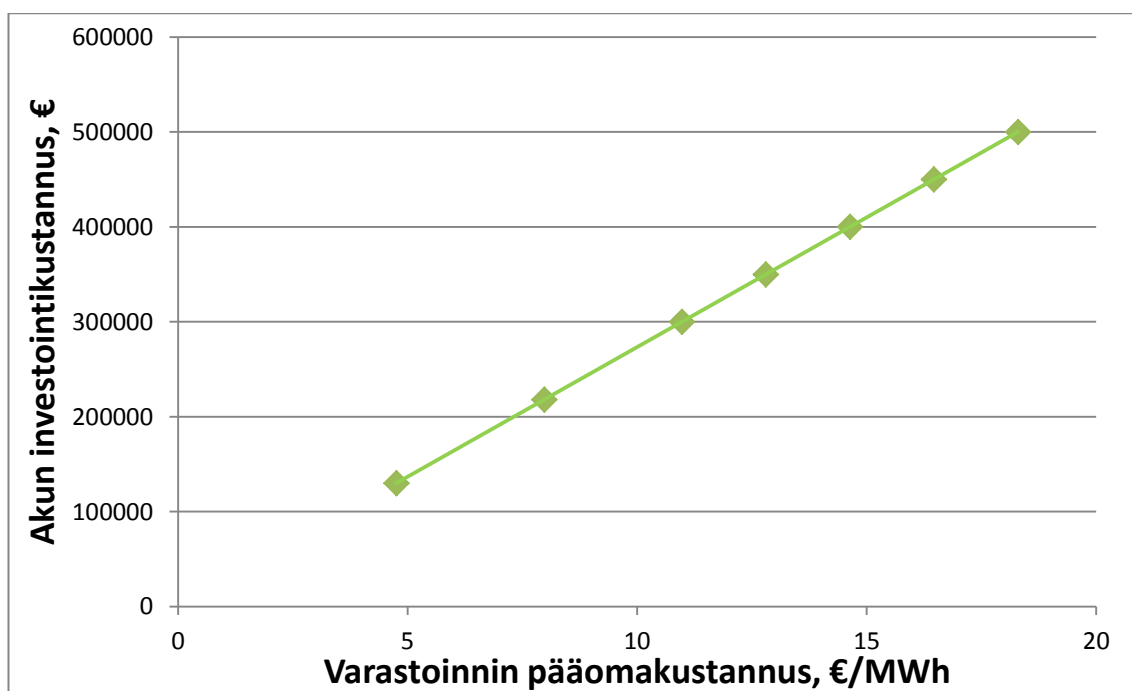
5.3 Lämpöakku

Optimaalisen kokoisen lämpöakun mitoitus tiettyyn kaukolämpöverkkoon on erittäin monimutkainen optimointitehtävä, johon vaikuttavat polttoaineiden kustannukset ja käyttömäärät, ilmasto-olosuhteet, verkon tehontarve ja sen vaihtelu, sähkön hinta, akun investointikustannukset ja monet muut muuttujat. Tutkittaessa Suomeen rakennettuja lämpöakkuja huomataan, että useimmat niistä ovat kooltaan pyöreitä lukuja kuten 10 000 m³, 15 000 m³ tai 20 000 m³, joten niissäkin koon optimointi on todennäköisesti toteutettu kokemusten puuttuessa varsin karkeasti. Mitoitukseen toki vaikuttaa myös akkutoimittajien tuotevalikoima. Tässä työssä ei siis ole mahdollista optimoida akun kokoa ottaen huomioon erittäin suuri määrä muuttujia ja niissä esiintyviä epävarmuuksia.

Varastoidun lämmön kustannuksia arvioitiin pienehkölle kapasiteetiltaan 30 MWh:n pystymalliselle sylinterin muotoiselle lämpöakulle, joka on rakennettu teräksestä ja jossa lämpö varastoituu tuntuvana lämpönä veteen. Ero tulo- ja menoveden lämpötilassa on 40 °C, säiliöstä 90 % on hyötytilavuutta ja lämpöhäviöt ovat 10 % varastoidusta lämmöstä. Tällöin yhtälöllä 3 saatiin säiliön tilavuudeksi noin 800 m³.

Kuvasta 23 saatiin tämän kokoluokan akulle hinnaksi 160 - 270 €/m³, eli investointi maksaisi 130 000 – 218 000 €. Oletetaan että akku ladataan ja puretaan 100 kertaa vuoden aikana, jolloin vuoden aikana varastoiduksi energiaksi saadaan 3000 MWh. Tällöin varastoinnille kertyy pääomakustannuksia 7 % korkokannalla ja 15 vuoden pitoajalla 4,76 – 7,98 €/MWh.

Kaukolämpöakun investointikustannuksiin liittyy kuitenkin huomattavaa epävarmuutta. Kaukolämpöakun kannattavuutta on laskettu myös Tampereen kaukolämpöverkkoon vuonna 2010 valmistuneessa diplomityössä. [50] Vuonna 2006 julkaistussa Kaukolämmön käsikirjassa annetaan tilavuudesta ja purkaustehosta riippuvat yhtälöt, jotka antavat 30 MWh:n kapasiteetin ja 10 MW:n purkaustehon akulle kustannuksiksi 121 000 €. Edellä mainitun diplomityön laskelmissa tarjouskyselyiden perusteella saatu hinta oli noin nelinkertainen Kaukolämmön käsikirjan antamaan arvioon verrattuna. On siis todennäköistä, että investointikustannukset nousisivat korkeammiksi kuin kuvan 23 yläraja, eli 270 €/m³. Kuvassa 29 on esitetty investoinnista aiheutuvat kustannukset megawattituntia kohden erisuuruisilla investointikustannuksilla oletuksella, että 30 MWh:n akku kävisi vuoden aikana läpi 100 lataus-purkaussykliä.



Kuva 29. Lämpöakun investointikustannusten vaikutus varastoinnin pääomakustannukseen megawattituntia kohti oletuksella, että vuosittain akku käy läpi 100 lataus-purkaussykliä

Kuvasta nähdään, että investointikustannusten noustessa tasolle 400 000 € varastoinnista aiheutuu kustannuksia noin 15 €/MWh, jolloin lämmön tuotantokustannus on pellettilämpökeskuksen muuttuvien kustannusten tasolla. Akun käytöstä aiheutuu myös muita kuin investointikustannuksia, mutta ne on jätetty tämän tarkastelun ulkopuolelle. Laskelmissa on otettu huomioon lämpöhäviöt 10 % suuruisina. Tämän on ajateltu pitävän sisällään pumppauksen sekä säiliön yläosan höyrypatjan ylläpidon kustannukset, koska todellisuudessa lämpöhäviöt ovat lyhytaikaisvarastoinnissa huomattavasti pienemmät kuin 10 %. Akku myös tuo useita muita kappaleessa 3.6 mainittuja etuja kaukolämpöjärjestelmään, joiden edut ovat todennäköisesti suuruudeltaan ainakin huolto- ja ylläpitokulujen suuruusluokkaa. Tulevaisuudessa säätösähkömarkkinoiden kehittyessä ja säätöelektrisuuden tarpeen kasvaessa

mahdollisuus tuottaa sähköä ja varastoida lämpö myöhempää käyttöä varten voi olla nykyistä huomattavasti tuottoisampaa. Nykyisillä sähkön hinnoilla akun hyödyt jäävät vähäisimmiksi. Lisäksi molempiin Savon Voiman verkkoihin joissa on CHP-tuotantoa, on jo päätetty investoida LTO-savukaasupesuri, jolloin öljyn käyttö niissä putoaa muutama prosenttiin polttoaineiden käytöstä. Niinpä tilanteita, joissa akulla pystytään korvaamaan öljyn käyttöä, on todella vähän. Optimaalisen kokoisen lämpöakun mitoitusta ja sen simulointi sähköntuotannon optimoinnin kannalta vaatisi lisätutkimista, jota ei voida tämän diplomityön puitteissa toteuttaa.

5.4 Pyrolyysiöljy

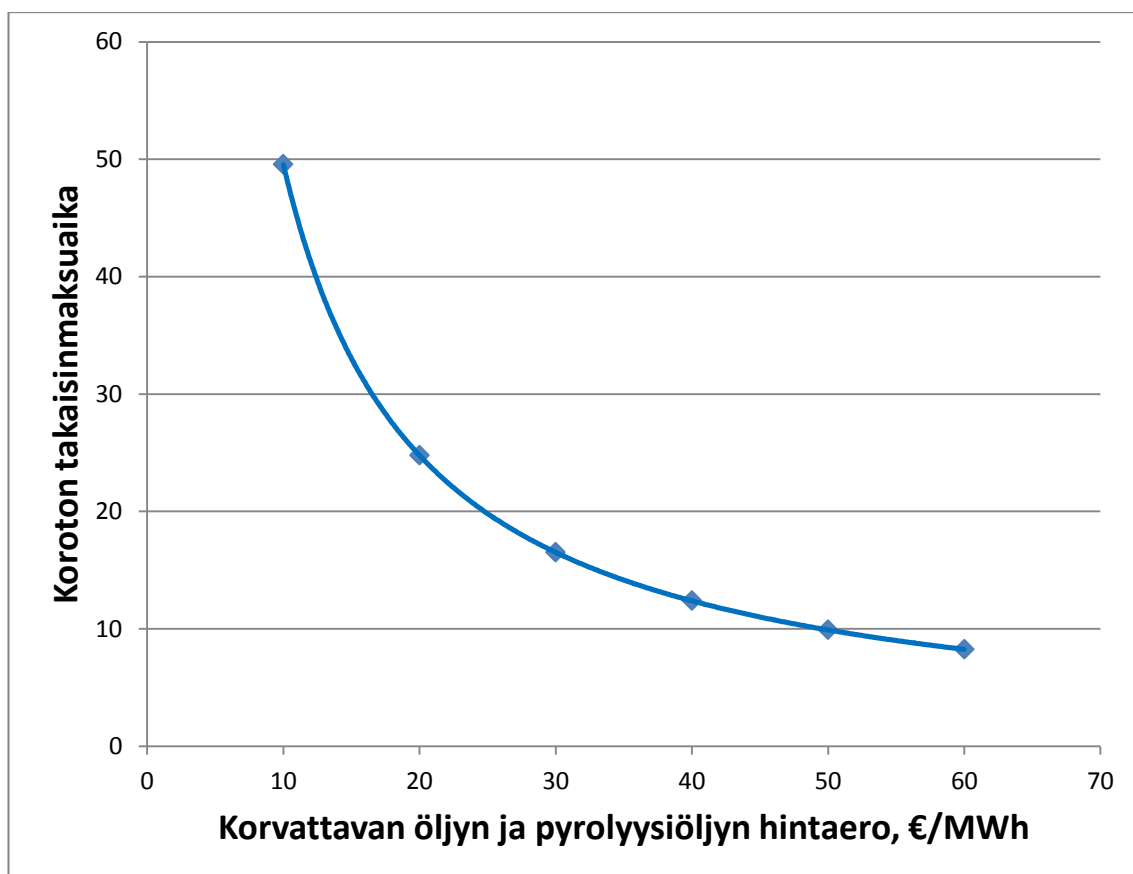
Tässä kappaleessa arvioidaan pyrolyysiöljylämpökeskuksen kannattavuutta Rautalammin ja Kiuruveden kaukolämpöverkoissa. Pyrolyysiöljylämpökeskusten mallinnettiin olevan seuraavina ajojärjestyksessä KPA-lämpökeskusten jälkeen. Rautalammin KPA-lämpökeskuksen revision pituudeksi mallinnettiin 2 viikkoa, jonka aikana tarvittava kaukolämpöteho tuotettiin pyrolyysiöljyllä. Kiuruveden suuremman KPA-lämpökeskuksen revision mallinnettiin kestävän 4 viikkoa, ja pienemmän KPA-lämpökeskuksen mallinnettiin olevan päätuotantolaitos tänä aikana. Pyrolyysiöljyn käytön investointikustannuksia arvioitiin saatujen tarjousten perusteella oletuksella, että olemassa oleva öljylämpökeskus muutettaisiin kummallakin paikkakunnalla toimimaan myös pyrolyysiöljyllä. Lisäksi molemmille lämpökeskustonteille täytyisi rakentaa 50 m³:n säiliö pyrolyysiöljylle. 99 m³:n pyrolyysiöljysäiliön hinta on saadun budjettitarjouksen mukaan 161 000 €. 50 m³:n pyrolyysiöljysäiliön investointikustannuksen arvioitiin olevan 0,66-kertainen 99 m³:n säiliön hintaan nähden, eli noin 106 000 €. Huolto- ja ylläpitokulujen arvioidaan olevan yhtä suuret kuin öljylämpökeskuksella, joten niitä ei tarvitse ottaa huomioon laskelmissa. Hyötysuhteena POK- ja PYR-kattiloille käytettiin 90 %. Laskelmissa oletetaan, että nykyiset pyrolyysiöljyn käyttöä hankaloittavat haasteet saadaan ratkaistua ja pyrolyysiöljylämpökeskus toimii miehittämättömänä luotettavasti kuten fossiilista öljyä polttavat lämpökeskukset.

Koska pyrolyysiöljylle ei vielä ole syntynyt vakiintuneita markkinoita, ei julkisia hintatietoja ole saatavilla. Investoinnin kannattavuutta voidaan kuitenkin arvioida tietämättä tarkkaa hintaa sen perusteella, kuinka paljon edullisempaa pyrolyysiöljyn täytyisi tällä käyttömäärällä olla, jotta se maksaisi takaisin suuremmat investointikustannuksensa. Fortum on esitteessään kuitenkin maininnut hinnan olevan verottoman raskaan ja kevyen polttoöljyn välissä. [51] Kappaleessa 2.4 kerrottiin tämän hetken kevyen polttoöljyn hinnaksi 61 €/MWh ja raskaan polttoöljyn hinnaksi 47 €/MWh. Jos oletetaan, että pyrolyysiöljyn hinta on näiden keskiarvo, saadaan sen hinnaksi 54 €/MWh. Hinnan epävarmuudesta johtuen laskenta kuitenkin suoritetaan laskemalla hintaero verrattuna korvaavaan öljyyn, jolla pyrolyysiöljyn käyttö olisi kannattavaa.

5.4.1 Pyrolyysiöljylämpökeskuksen kannattavuus Rautalammilla

Kannattavuutta Rautalammille tutkittiin 1,5 MW:n pyrolyysiöljylämpökeskukselle, joka toteutettaisiin tekemällä muutostyöt jo käytössä olevalle 2,5 MW:n öljylämpökeskukselle. Polttimen ja putkiston muutostöille arvioitiin hinnaksi 115 000 €. Yhteensä muutostöiden hinnaksi arvioitiin siis säiliö mukaan lukien noin 221 000 €.

1,5 MW:n pyrolyysiöljylämpökeskus olisi vuosina 2011 – 2014 korvannut keskimäärin 450 MWh fossiilista öljyä. 7 % korkokannalla ja 15 vuoden pitoajalla investoinnin vuotuisiksi pääomakustannuksiksi saadaan noin 24 300 €. Jotta pääoman tuottotavoitteeseen päästäisiin, eli vuosittaiset säästöt polttoainekustannuksissa olisivat pääomakustannusten suuruiset, korvattavan öljyn ja pyrolyysiöljyn hintaeron täytyisi olla noin 50 €/MWh. Kuvassa 30 on esitetty 1,5 MW:n pyrolyysiöljylämpökeskuksen korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn ja pyrolyysiöljyn hintaeron funktiona.



Kuva 30. Pyrolyysiöljylämpökeskuksen koroton takaisinmaksuaika pyrolyysiöljyn ja korvattavan öljyn hintaeron funktiona Rautalammilla

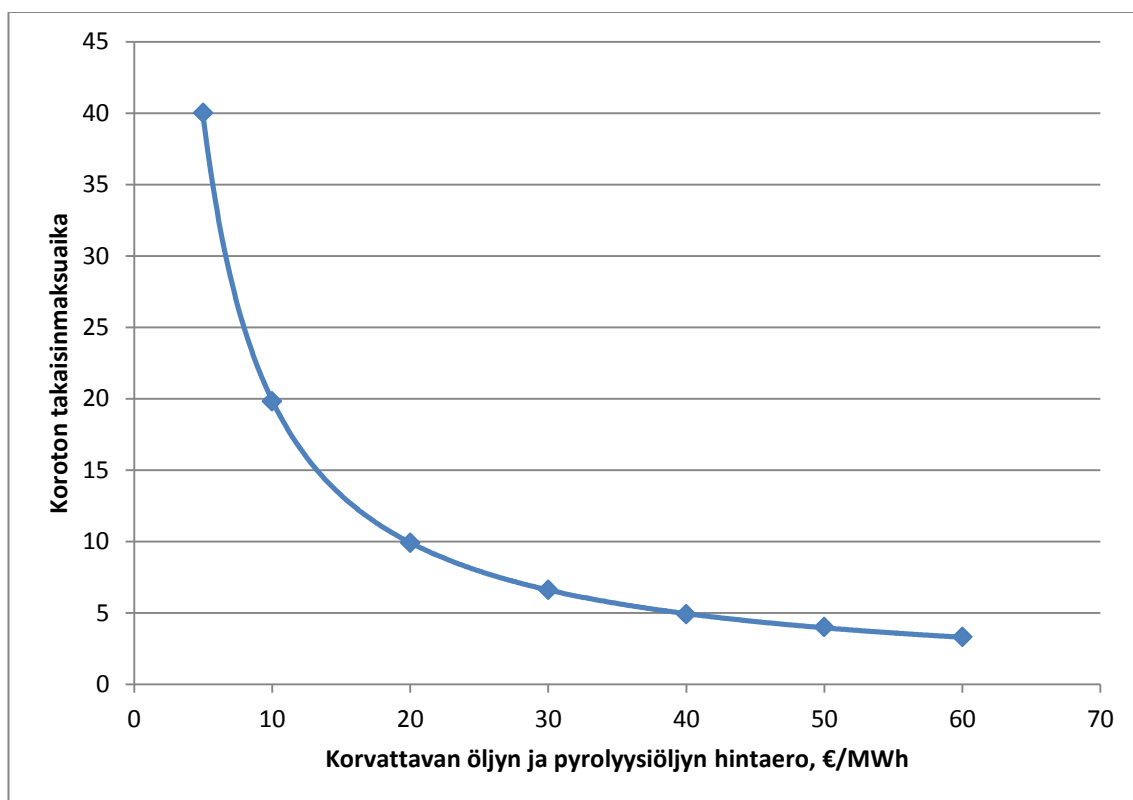
Kuvaajasta nähdään, että Rautalammille ei ole tällä hetkellä kannattavaa investoida pyrolyysiöljylämpökeskukseen, koska edellisen kappaleen pyrolyysiöljyn hinta-arviolla

polttoöljyn hinnan täytyisi lähes kaksinkertaistua jotta takaisinmaksuaika laskisi kannattavalle tasolle.

5.4.2 Pyrolyysiöljylämpökeskuksen kannattavuus Kiuruvedellä

Pyrolyysiöljyn käytön kannattavuutta Kiuruvedellä tutkittiin 4 MW:n lämpökeskukselle, joka toteutettaisiin saneeraamalla Kiuruvedellä oleva 6 MW:n kevytöljylämpökeskus toimimaan myös pyrolyysiöljyllä. Polttimen ja putkistojen muutostöiksi arvioitiin 120 000 €. Yhteensä muutostöille arvioitiin siis hinnaksi säiliö mukaan lukien noin 241 000€.

4 MW pyrolyysiöljylämpökeskus olisi korvannut öljyn käyttöä keskimäärin 1219 MWh vuosittain. 7 % korkokannalla ja 15 vuoden pitoajalla investoinnin vuotuisiksi pääomakustannuksiksi saadaan noin 25 000 €. Jotta polttoainekustannuksissa säästäisi vuosittaisten pääomakustannusten verran, pyrolyysiöljyn ja korvattavan fossiilisen öljyn hintaeron täytyisi olla noin 22 €/MWh. Kuvassa 31 on esitetty korottomat takaisinmaksuajat pyrolyysiöljyn ja korvattavan polttoöljyn hintaeron funktiona.



Kuva 31. Pyrolyysiöljylämpökeskuksen koroton takaisinmaksuaika pyrolyysiöljyn ja korvattavan öljyn hintaeron funktiona Kiuruvedellä

Kuvaajasta nähdään, että pyrolyysiöljylämpökeskus ei ole kannattava investointi myöskään Kiuruvedelle nykytilanteessa. Öljyn hinnan ei kuitenkaan tarvitsisi nousta radikaalisti, jotta pyrolyysiöljylämpökeskus olisi kannattava investointi. Jos

pyrolyysiöljyn hinnaksi arvioidaan kappaleen alussa esitetty 54 €/MWh, kevyen polttoöljyn hinnan täytyisi nousta noin 27 % jotta sitä kannattaisi korvata pyrolyysiöljyllä. Lähivuosina käytössä on kuitenkin vielä myös edullisempi raskas polttoöljy, jonka hinnan täytyisi lähes kaksinkertaistua, jotta sitä kannattaisi korvata pyrolyysiöljyllä.

5.5 Pellettikattilat

Tässä kappaleessa arvioidaan arina- ja pölypellettilämpökeskusten kannattavuutta Rautalammin, Kiuruveden ja Iisalmen kaukolämpöverkkoihin. Laskennassa pelleteille käytettiin hintana 35 €/MWh. Kannattavuutta Rautalammille vertailtiin 0,2 MW:n, 0,4 MW:n, 0,5 MW:n, 0,7 MW:n ja 1 MW:n lämpökeskuksille. Kiuruvedelle vertailtiin 1 MW:n 2 MW:n, 3 MW:n ja 4 MW:n pellettilämpökeskuksia. Iisalmeen mallinnettiin 2 MW:n ja 3 MW:n arinapellettilämpökeskusten ja 10 MW:n pölypellettilämpökeskuksen kannattavuudet. Pienempiä pölypellettilaitoksia ei mallinnettu, koska saadun budjettitarjouksen perusteella investointikustannukset eivät laske merkittävästi laitokseen pienentyessä ja pölypolttolämpökeskus on ajettavissa myös pienillä kuormilla. Ylläpito- ja huoltokustannukset on arvioitu kaksinkertaisiksi huolto-ohjelmaan verrattuna, koska Lapinlahden verrokkilaitoksella on ollut huomattavan paljon ongelmia pölyn käsittelylaitteistossa ja kulutusosia on joutunut vaihtamaan huomattavasti ennakoitua useammin. Taulukkoon 6 on kerätty laskuissa käytettyjä eri pellettilämpökeskusten investointi- ja huoltokustannuksia, jotka on saatu jo toteutetuista Savon Voiman investoinneista ja saaduista budjettitarjouksista. Hinnat sisältävät koko lämpökeskuksen mukaan lukien maarakennustyöt ja sähköliittymän rakentamisen.

Taulukko 6. Pellettilämpökeskusten investointikustannukset ja vuosittaiset ylläpitokustannukset

Pellettilämpökeskus (MW)	Investointikustannukset (€)	Vuosittaiset huoltokustannukset (€)
0,2	229 000	3000
0,4	259 000	4000
0,5	274 000	5000
0,7	470 000	7000
1	515 000	10 000
2	600 000	10 000
3	900 000	15 000
4	1 100 000	20 000
10 (pölypoltto)	2 780 000	30 000

Pellettilämpökeskus olisi toteutettavissa myös hyödyntämällä olemassa olevan öljylämpökeskuksen tulitorvi-tuliputkikattilaa. Muutos voi olla kannattava, jos tarpeeksi hyväkuntoinen öljykattila vapautuu käytettäväksi ja lämpökeskukselle löytyy valmiiksi tarpeeksi tilava rakennus. Lämpökeskus voitaisiin mahdollisesti sijoittaa Kiuruvedelle rakennukseen, jossa Savon Voimalla on tällä hetkellä käytöstä poistettu moottorivoimalaitos ja öljylämpökeskus. Muilla paikkakunnilla sopivan rakennuksen löytäminen on epätodennäköistä. Taulukossa 7 on arvioitu muutostöiden kustannuksia käyttäen lähteenä Savon Voiman investoinneista vastaavan projektipäällikkö Hannu Lipsasen arvioita ja eräältä pellettipoltintoimittajalta saatua budjettitarjousta.

Taulukko 7. Kustannusten jakautuminen saneerattaessa öljylämpökeskuksesta 2 MW:n pellettilämpökeskus

Kustannustekijä	Arvioidut kustannukset (€)
Savupiippu	40 000
Perustukset pellettisiiloille	40 000
Asennukset ja kattilan muutostyöt	55 000
Muutokset rakennukselle	20 000
Vanhan öljykattilan purkaminen	15 000
Suunnittelukustannukset	30 000
Siivous yms. kustannukset	5000
Pellettipoltin	200 000
Yhteensä	405 000

Suunniteltaessa muutostöitä on kuitenkin otettava huomioon, että uutena ostettavan pellettilämpökeskuksen käyttöikä on todennäköisesti korkeampi kuin öljykattilasta saneeratun. Saneeratun lämpökeskuksen edullisempi hinta aiheutuu käytettyjen komponenttien hyödyntämisestä, jonka vuoksi ne myös tulevat aikaisemmin käyttöikänsä päähän. Lisäksi muutostyöt vaativat paljon asiantuntemusta, joten jos vastaavasta projektista ei ole aikaisempaa kokemusta, investointi voi tulla arvioitua suuremmaksi ja laitoksen käytettävyyys uutta lämpökeskusta alhaisemmaksi. Näiden tekijöiden rahallista arvoa on haastavaa määrittää, mutta ne on otettava huomioon investointia suunniteltaessa.

Öljy- ja pellettikattiloille käytettiin laskuissa kattilahyötysuhdetta 90 %. Pellettikattilat mallinnettiin tuottamaan tehoa heti, kun kiinteän polttoaineen laitosten tehot eivät riitä kattamaan verkon lämpökuormaa. Tämä vastaa todellista tilannetta hyvin, koska pellettikattilat ovat varsin nopeita ajaa ylös, ja tehon tarpeen kasvu voitaisiin ennakoida sääennusteiden perusteella.

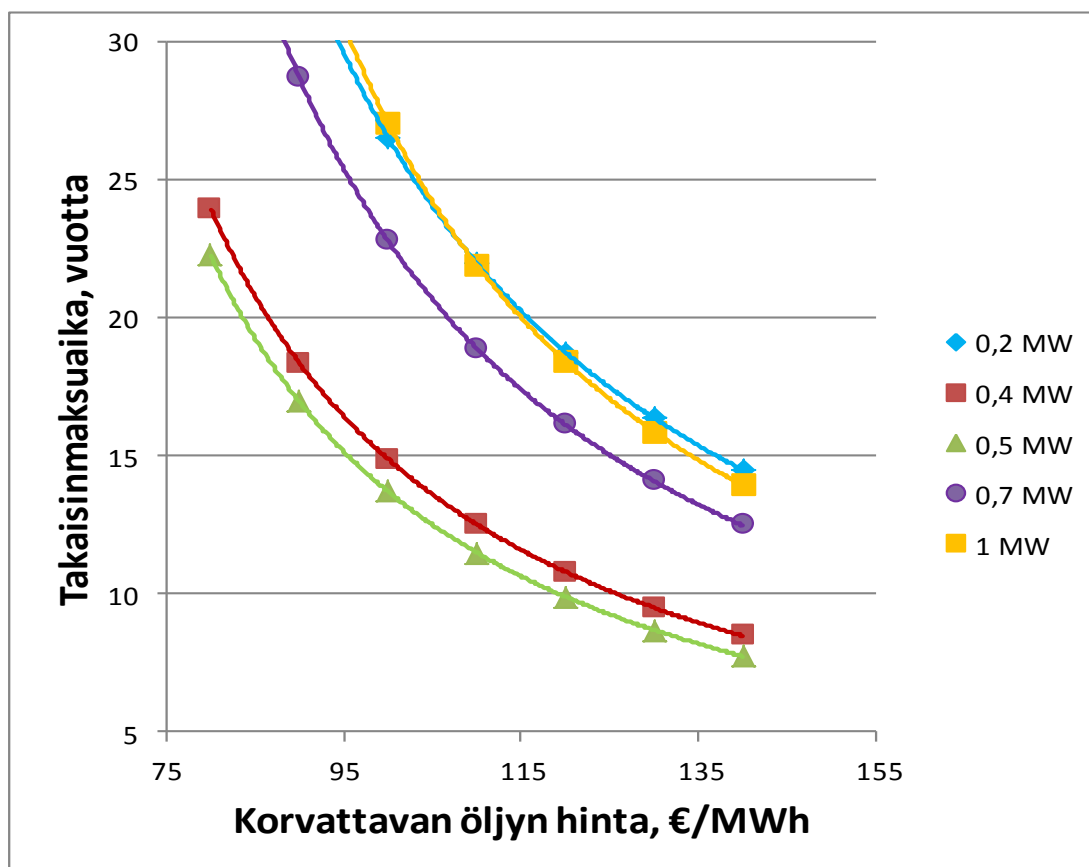
5.5.1 Pellettilämpökeskusten kannattavuus Rautalammilla

Joka vuoden heinäkuulle mallinnettiin LK40:n revisio kahden viikon pituisena. Tämän aikana tarvittava teho tuotettiin pellettilämpökeskuksella ja öljyllä. Taulukossa 8 on esitetty, paljonko polttoöljyn käyttöä kukin pellettilämpökeskuksista korvaisi simuloinnin perusteella.

Taulukko 8. Simuloinnin tuloksena saadut erikokoisten pellettilämpökeskusten vuosittain korvaamat öljymäärät Rautalammilla

Pellettilämpökeskuksen teho (MW)	Vuosittain korvattu öljymäärä (MWh)
0,2	179
0,4	329
0,5	385
0,7	425
1	447

Taulukosta huomataan että huipun käyttöaika pienenee huomattavasti yli 0,5 MW:n teholla. Kuvassa 32 on esitetty erikokoisten lämpökeskusten korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan funktiona pelletin hinnalla 35 €/MWh.



Kuva 32. Erikokoisten pellettilämpökeskusten korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan funktiona Rautalammilla

Lyhyin takaisinmaksuaika saadaan 0,5 MW:n lämpökeskukselle. Tämä olisi luonnollinen valinta paikkakunnalle myös sen takia, että kaukolämpöverkon kesäkuorman suuruus on 0,4 - 0,5 MW, joten 0,5 MW:n lämpökeskus riittäisi yksinään tuottamaan tarvittavan tehon ainakin suurimman osan ajasta LK40:n kesärevision aikana. 0,5 MW:n lämpökeskus täyttää pääoman tuottotavoitteen, kun korvattavan öljyn hinta on noin 126 €/MWh. Se ei siis vaikuta kannattavalta investoinnilla nykyisellä öljyn hinnalla.

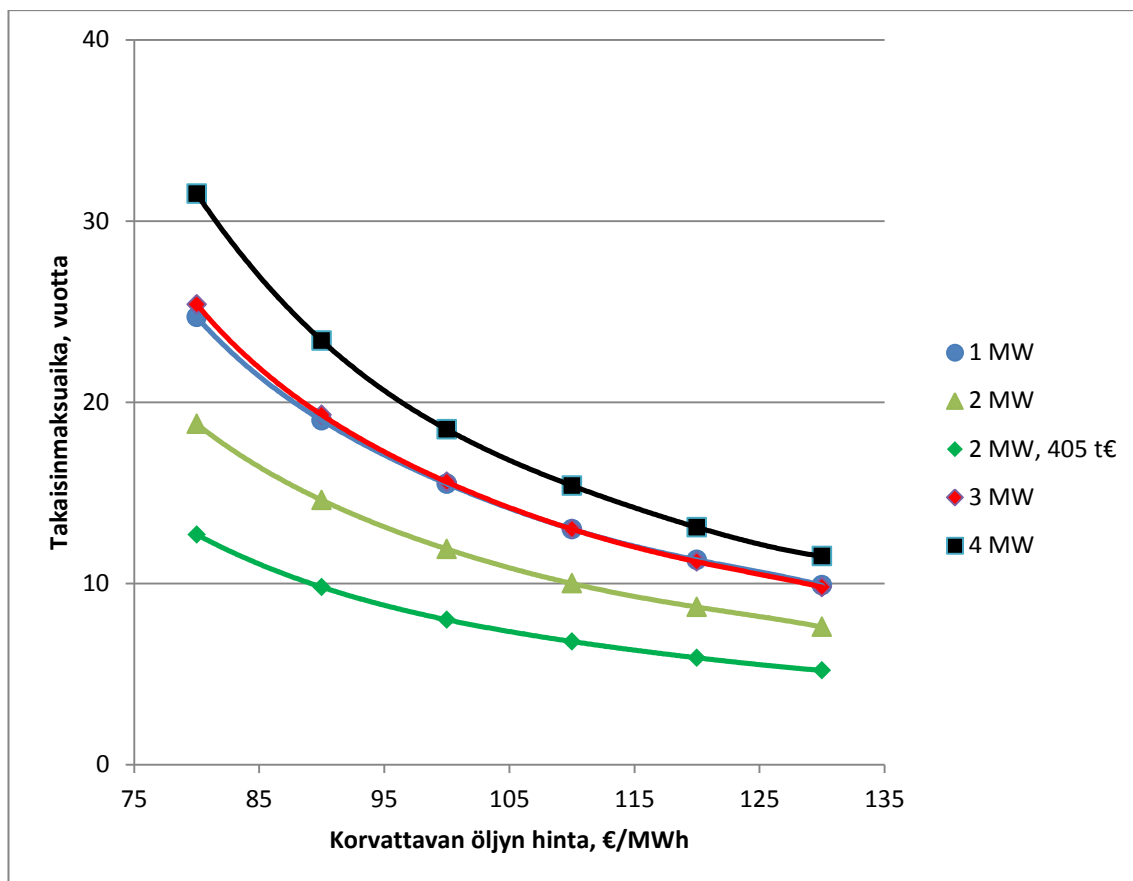
5.5.2 Pellettilämpökeskusten kannattavuus Kiuruvedellä

Joka vuoden heinäkuulle mallinnettiin VL4:n revisio, jolloin LK66:n teho ei usein riittänyt kattamaan verkon tehon tarvetta ja pellettilämpökeskuksille tuli siten käyttötunteja myös kesäisin. Taulukkoon 9 on kerätty Kiuruvedelle mallinnetut pellettilämpökeskukset ja simuloinnin tuloksena saadut vuosittain niiden korvaamat öljyn määrät.

Taulukko 9. Simuloinnin tuloksena saadut erikokoisten pellettilämpökeskusten vuosittain korvaamat öljymäärät Kiuruvedellä

Pellettilämpökeskuksen teho (MW)	Vuosittain korvattu öljymäärä (MWh)
1	605
2	931
3	1120
4	1220

Taulukosta huomataan, että 2 MW:n tehon jälkeen lämpökeskuksen korvaama öljyn määrä kasvaa tehon kasvaessa huomattavasti hitaammin vaikka investointikustannukset kasvavat lähes lineaarisesti tehon funktiona. Muuttaessa öljylämpökeskusta pellettikäyttöiseksi, yli 2 MW:n laitoskoko ei todennäköisesti ole järkevä, vaan esimerkiksi 3 MW:n. keskus täytyisi todennäköisesti jakaa kahdeksi 1,5 MW:n yksiköksi. Kuvassa 33 on esitelty erikokoisten pellettilämpökeskusten korottomat takaisinmaksuajat pelletin hinnalla 35 €/MWh korvattavan lämmitysöljyn hinnan funktiona. 2 MW:n pellettilämpökeskuksen kannattavuus on laskettu myös tapaukselle, jossa se saataisiin toteutettua öljykattilaa modifioimalla hintaan 405 000 €.



Kuva 33. Erikokoisten pellettilämpökeskusten korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan funktiona Kiuruvedellä

Pienimmät takaisinmaksuajat saadaan 2 MW:n lämpökeskuksille. Tutkitaan siis tarkemmin niiden kannattavuuden reunaehtoja. Kuvasta nähdään, että takaisinmaksuaika muodostuu 600 000 € investointikustannuksilla kannattavan suuruiseksi vasta, kun öljyn hinta nousee tasolle 120 €/MWh. Pääoman tuottotavoitteeseen päästään korvattavan öljyn hinnalla 117 €/MWh. 2 MW:n pellettilämpökeskus tulee kannattavaksi valituilla pääoman tuottovaatimuksilla, 600 000 € investointikustannuksilla, 10 000 € vuosittaisilla huoltokustannuksilla ja nykyisillä polttoaineiden hinnoilla, kun se korvaa noin 2700 MWh öljyllä tuotettua energiaa vuodessa.

Investointikustannusten laskeminen tasolle 405 000 € tuottaa 2 MW:n pellettilämpökeskukselle nykyisillä polttoaineiden hinnoilla korottomaksi takaisinmaksuajaksi 31 vuotta. Mikäli pellettilämpökeskus pystyttäisiin rakentamaan hinnalla 405 000 €, se tulisi kannattavaksi korvattessaan noin 2000 MWh öljyllä tuotettua energiaa edellä mainituilla alkuarvoilla. Käytettäessä muuttujana öljyn hintaa, pääoman tuottotavoitteeseen päästäisiin korvattavan öljyn hinnalla 94 €/MWh.

5.5.3 Pellettilämpökeskusten kannattavuus lisalmessa

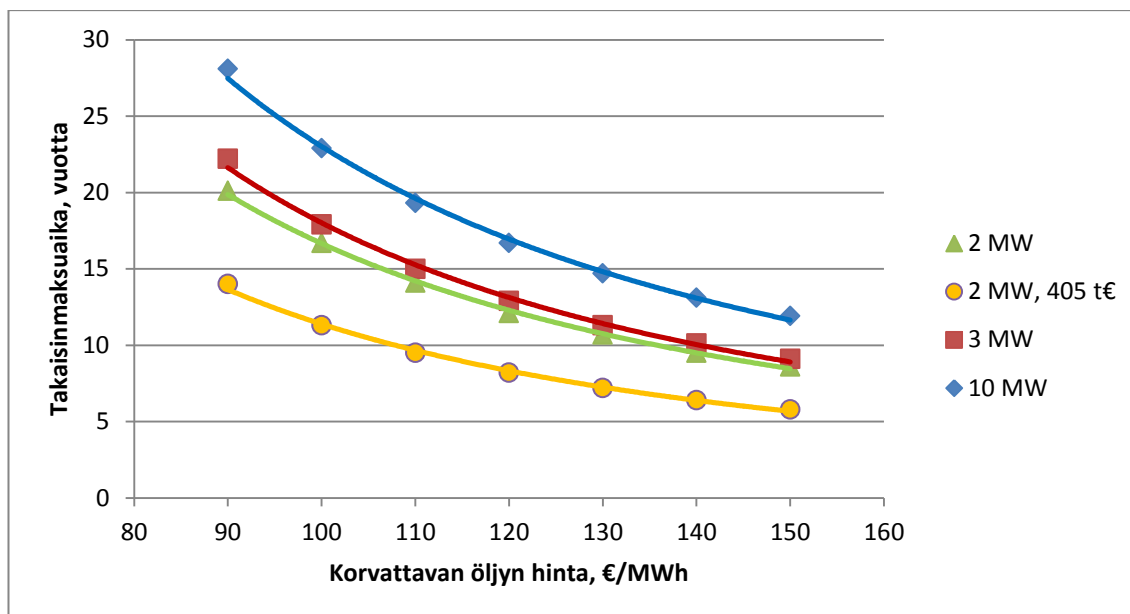
VL2:n oletettiin olevan pois käytöstä kesäisin, jolloin tarvittava teho tuotettiin LK67:lla. Myös syksyllä 2015 valmistuva LTO-savukaasupesuri otettiin huomioon mallissa. Sen oletettiin tuottavan 20 % VL2:n kattilatehosta kunakin ajanhetkenä. Pellettilämpökeskusten oletettiin olevan ajojärjestyksessä ennen pyrolyysiöljylämpökeskusta edullisempien muuttuvien kustannusten johdosta.

Lisalmen kaukolämpöverkon tuotantolaitokset kuuluvat päästökaupan piiriin, joten öljyn käytön hintaan otettiin huomioon päästöoikeuksien hankinta ominaispäästökertoimella $0,267 \text{ t}_{\text{CO}_2}/\text{MWh}$ ja päästöoikeuden hinnalla $8 \text{ €/t}_{\text{CO}_2}$. Pölypelletin tapauksessa ei otettu huomioon sen käyttämää kevyttä polttoöljyä, koska sillä ei tarvitsisi ajaa niin pieniä kuormia, että käynnistyksiä kertyisi paljon. Tällöin sen kuluttaman kevyen polttoöljyn määrä ei ole merkittävä. Taulukossa 10 on esitetty 2 MW:n ja 3 MW:n arinapellettien sekä 10 MW:n pölypellettilaitoksen vuosittain keskimäärin korvaamat öljymäärät lisalmessa.

Taulukko 10. Simuloinnin tuloksena saadut erikokoisten pellettilämpökeskusten vuosittain korvaamat öljymäärät lisalmessa

Lämpökeskus	Vuosittain korvaama öljymäärä (MWh)
2 MW arina	614
3 MW arina	876
10 MW pölypoltto	2031

Kuvaan 34 on kerätty eri vaihtoehtojen korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan funktiona. 2 MW:n arinapellettilämpökeskuksesta on vertailtu sekä avaimet käteen -toimituksena tilattuna, että mahdollisesti toteutettavissa olevaa Savon Voiman toteuttamaa öljylämpökeskuksesta modifioitua vaihtoehtoa. Tälle keskukselle arvioitiin edellisessä kappaleessa investointikustannuksiksi 405 000 €.



Kuva 34. Erikokoisten pellettilämpökeskusten korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan funktiona Iisalmessa

Kuvasta huomataan, että pellettilämpökeskus ei ole missään kokoluokassa kannattava investointi ilman, että öljyn hinta nousee huomattavasti. Kannattavin vaihtoehto olisi pienin öljykattilasta muokattu 2 MW:n pellettilämpökeskus, joka sekin vaatisi korvattavalle öljylle hinnaksi 113 €/MWh jotta pääoman tuottotavoitteeseen päästäisiin. Avaimet käteen –toimituksena tilattuna öljyn hinnan täytyisi vastaavasti olla 144 €/MWh tuottotavoitteen saavuttamiseksi 2 MW:n lämpökeskuksella.

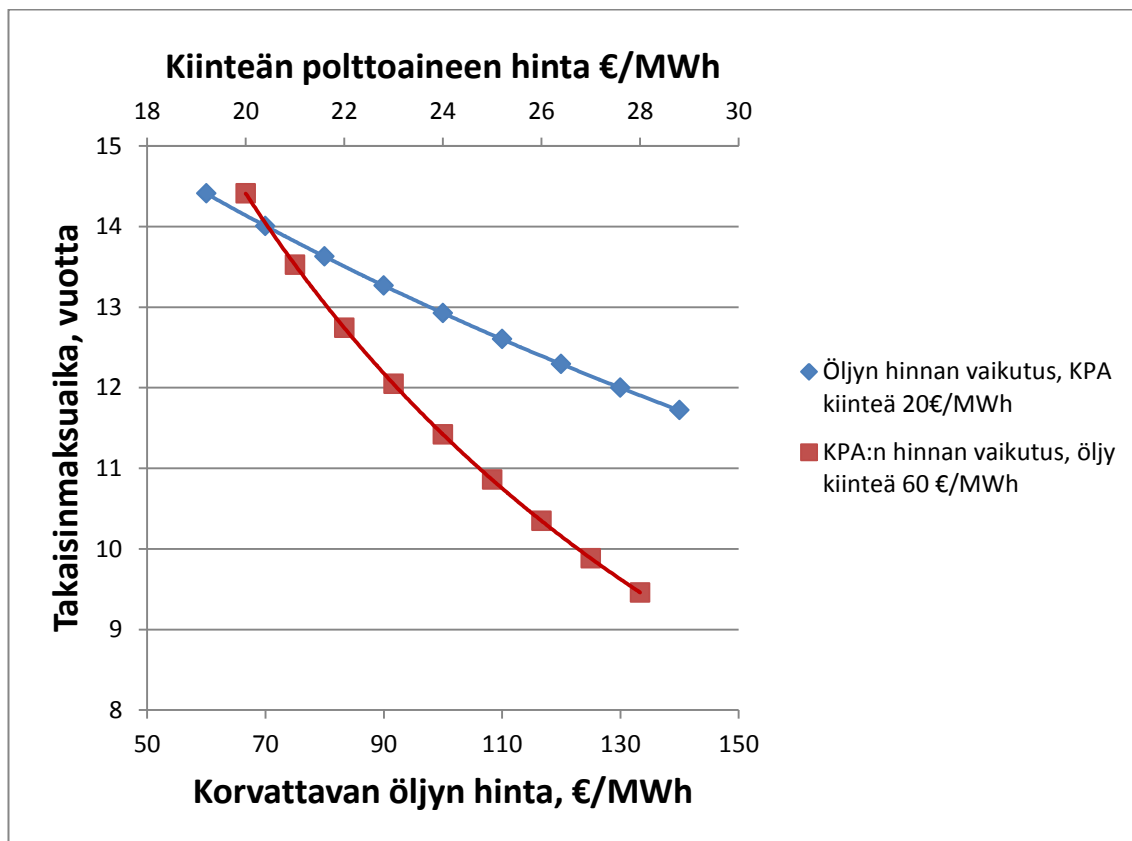
5.6 LTO–savukaasupesuri

Tässä kappaleessa tutkitaan lämpöä talteen ottavan savukaasupesurin kannattavuutta Rautalammin ja Kiuruveden kaukolämpöverkoissa. Pesurin oletettiin tuottavan 20 % KPA-kattilan lämpötehosta. Öljykattiloille käytettiin kattilahyötysuhdetta 90 % ja KPA-kattiloille 85 %. LTO-pesurin kannattavuus ei riipu niin voimakkaasti öljyn hintakehityksestä kuin esimerkiksi pellettilämpökeskuksella, koska suuri osa säästöistä kertyy kiinteän polttoaineen käytön vähentymisestä. Tästä syystä herkkyytstarkasteluissa tutkitaan myös kiinteän polttoaineen hinnan vaikutusta kannattavuuteen.

5.6.1 LTO-savukaasupesurin kannattavuus Rautalammillla

Rautalammillla kiinteän polttoaineen lämpökeskukselle mallinnettiin kahden viikon revisio joka vuodelle heinäkuun loppuun. Tämän lisäksi pesurin oletettiin olevan poissa käytöstä kesäkuun puolesta välistä elokuun puoleen väliin kiinteän polttoaineen kattilan minimikuorman vuoksi. Pesurin investointikustannuksiksi arvioitiin 450 000 € ja vuosittaisiksi käyttökustannuksiksi 15 000 €. Vuosina 2011 - 2014 pesuri olisi keskimäärin vähentänyt 90 MWh öljyn ja 2043 MWh kiinteän polttoaineen käyttöä.

Kuvassa 35 on esitetty LTO-pesurin korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan ja KPA:n hinnan funktiona Rautalammilla.



Kuva 35. Kiinteän polttoaineen ja korvattavan öljyn hintojen vaikutus LTO-savukaasupesurin korottomaan takaisinmaksu-aikaan Rautalammilla

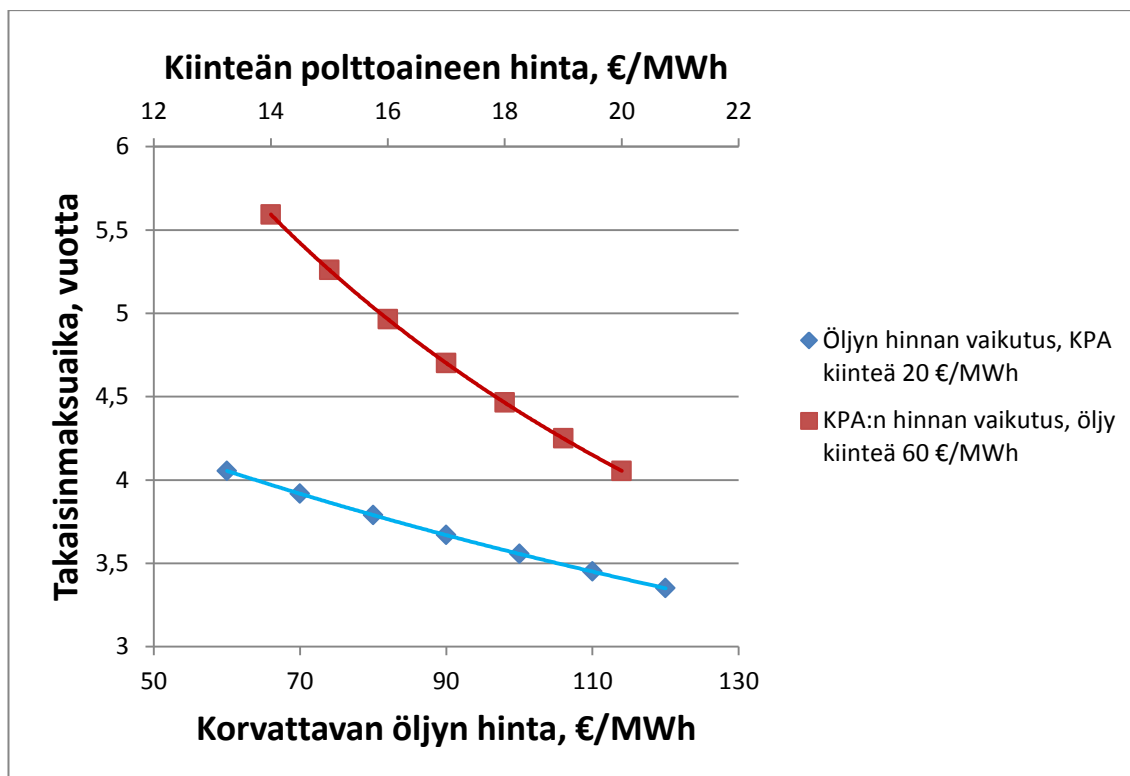
Kuvasta huomataan, että kannattavuus on huomattavasti herkempi kiinteän polttoaineen kuin öljyn hinnan muutoksille. Korvattavan öljyn hinnan täytyy olla tasolla 270 €/MWh, jotta päästään pääoman tuottotavoitteeseen kiinteän polttoaineen hinnalla 20 €/MWh. Jos lukitaan öljyn hinta tasolle 60 €/MWh ja käytetään muuttujana kiinteän polttoaineen hintaa, pääoman tuottotavoitteeseen päästään hinnalla 29 €/MWh. Rautalammin KPA-lämpökeskus on siis liian pieni kokoluokaltaan, jotta pesuri-investointi vähentäisi kiinteän polttoaineen kulutusta tarpeeksi maksaakseen korkeat investointikustannuksensa. Toisaalta öljyn kulutus muulloin kuin kesärevision aikaan on hyvin vähäistä, joten pesurilla korvattava öljymäärä jää hyvin pieneksi. LTO-pesuri Rautalammille ei siis vaikuta kannattavalta investoinnilta. Liitteessä 1 on esitetty simuloinnin perusteella vuodelta 2011 piirretty tehokaavio.

5.6.2 LTO-savukaasupesurin kannattavuus Kiuruvedellä

Kiuruvedellä suuremman KPA-lämpölaitoksen ja siten pesurin olettiin olevan pois käytöstä revision vuoksi jokaisen vuoden heinäkuun. Pienemmän 3,5 MW:n KPA-kattilan mallinnettiin olevan käytössä talvella sekä heinäkuussa suuremman laitoksen

revision aikana. Syksyllä pienempi laitos ajettiin mallinnuksessa ylös, kun ulkolämpötilat laskevat niin alas etteivät suurempi KPA-kattila ja pesuri riittäneet kattamaan kaukolämpökuormaa. Siitä alkaen pienempi laitos oli käytössä vähintään 700 kW:n minimiteholla kevääseen, kunnes ulkolämpötilat nousivat niin suuriksi että suurempi laitos ja pesuri riittivät ”riittävän todennäköisesti” kaukolämpökuorman tuottamiseen. Tämä olisi ennakoitavissa sääennusteiden perusteella ja tapahtui simuloinnissa tyypillisesti huhtikuun alkupuolella. Pesurin investointikustannuksiksi arvioitiin 800 000 € ja vuosittaisiksi käyttökustannuksiksi 25000 €. Öljylle käytettiin laskelmissa hintaa 60 €/MWh ja kiinteälle polttoaineelle 20 €/MWh.

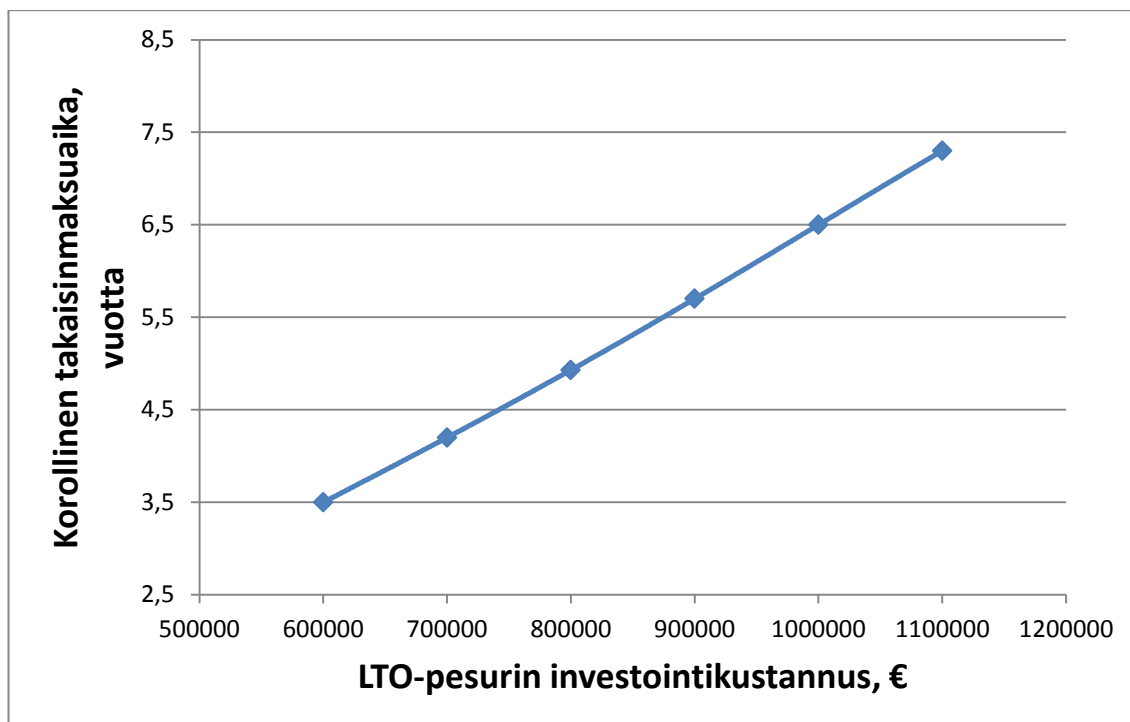
Vuosina 2011 – 2014 pesuri olisi keskimäärin vähentänyt 691 MWh öljyn ja 9041 MWh kiinteän polttoaineen käyttöä vuosittain. Edellä mainituilla polttoaineiden hinnoilla pesurin aiheuttamat säästöt polttoainekustannuksissa ovat noin 222 000 € vuosittain. Investoinneista koituu vuosittain pääomakustannuksia noin 88 000 € ja ylläpitokustannuksia 25 000 €. Näin saadaan vuosittaiseksi tuotoksi käyttö- ja pääomakustannusten jälkeen noin 110 000 €, joten LTO-pesurin investoiminen Kiuruveden 8 MW:n laitokselle vaikuttaa erittäin kannattavalta. Samoilla lähtöarvoilla saadaan korottomaksi takaisinmaksuajaksi noin 4,1 vuotta ja korolliseksi takaisinmaksuajaksi noin 4,9 vuotta. Todellisuudessa takaisinmaksuajat voivat olla jonkin verran tätä pidempiä, koska Kiuruvedellä käytetään polttoaineena myös sahateollisuuden sivutuotteita, jotka ovat hinnaltaan hakeita edullisempia. Mallin mukaan polttoöljyn kulutus Kiuruvedellä putoaa pesurin ansiosta noin 25 %. Kylmänä talvena pudotus on edellä mainittua suurempi. Kuvassa 36 on esitetty takaisinmaksuajan riippuvuus öljyn ja kiinteän polttoaineen hinnoista.



Kuva 36. Kiinteän polttoaineen ja korvattavan öljyn hintojen vaikutus LTO-savukaasupesurin korottomaan takaisinmaksuaikaan Kiuruvedellä

Kuvasta nähdään, että kannattavuus on myös Kiuruvedellä huomattavasti herkempi kiinteän polttoaineen hinnan muutoksille. Takaisinmaksuaika nykyisillä polttoaineiden hinnoilla on kuitenkin niin lyhyt, että LTO-pesurin muuttuminen kannattamattomaksi vaatisi käytännössä kiinteän polttoaineen hinnan romahtamisen, jollaista ei ole näköpiirissä. Liitteessä 2 on esitetty Kiuruveden eri laitosten tuntikohtaiset tehot vuonna 2011, mikäli suuremman lämpökeskuksen yhteyteen olisi rakennettu LTO-pesuri.

Koska pesurin investointikustannuksiin liittyy epävarmuutta, on syytä tarkastella kuinka kannattavuus muuttuu niiden suhteen. Kuvassa 37 on esitetty LTO-pesurin korolliset takaisinmaksuajat investointikustannusten funktiona polttoöljyn hinnalla 60 €/MWh ja kiinteän polttoaineen hinnalla 20 €/MWh.



Kuva 37. LTO-pesurin investointikustannusten vaikutus korolliseen takaisinmaksuaikaan Kiuruvedellä KPA:n hinnalla 20 €/MWh ja öljyn hinnalla 60 €/MWh

Kuvasta nähdään, että LTO-pesuri olisi kannattava investointi, vaikka investointikustannukset nousisivat korkeammiksi kuin aiemmin laskennassa käytetty 800 000 €. Annuiteettimenetelmällä laskettuna nähdään, että vielä 1 100 000 €:n investointikustannuksillakin vuosittaiset tuotot käyttö- ja pääomakustannusten jälkeen olisivat noin 77 000 €.

5.7 Lämpöpumput

Tällä hetkellä ainut kaukolämpöverkko, jossa on merkittävästi öljyn kulutusta ja verkon lähistöllä hukkalämmön lähteitä on Kiuruvesi. Siellä on KPA-lämpökeskusten läheisyydessä saha, joka käyttää kaukolämpöä kamarikuivaamoissaan sahatavaran kuivaamiseen. Lämpöpumpulla tuotettu lämpö olisi todennäköisesti kuitenkin muuttuvilta kustannuksiltaan hakkeella, kuorella ja sahanpurulla tuotettua lämpöä kalliimpaa tai matalammillaankin noin samanhintaista, joten sillä kannattaisi korvata vain öljyn käyttöä. KPA-tuotantokapasiteetti riittää noin ulkolämpötilaan -10 °C asti, jolloin öljyä korvaavia käyttötunteja kertyisi vuosittain vain vähän. Kuivaamotoimittajan mukaan lämmön talteenotto tuskin olisi kannattavaa. Koska tämän työn puitteissa ei pystytä tekemään tarkempaa analyysiä kuin laitteen toimittaja, katsotaan lämmön talteenotto sahalta kannattamattomaksi. Jatkuvatoimisessa kanavakuivaamossa lämmön talteenoton kannattavuus voisi olla joillain reunaehdoilla kannattavaa. [52]

5.8 Sähkökattilat

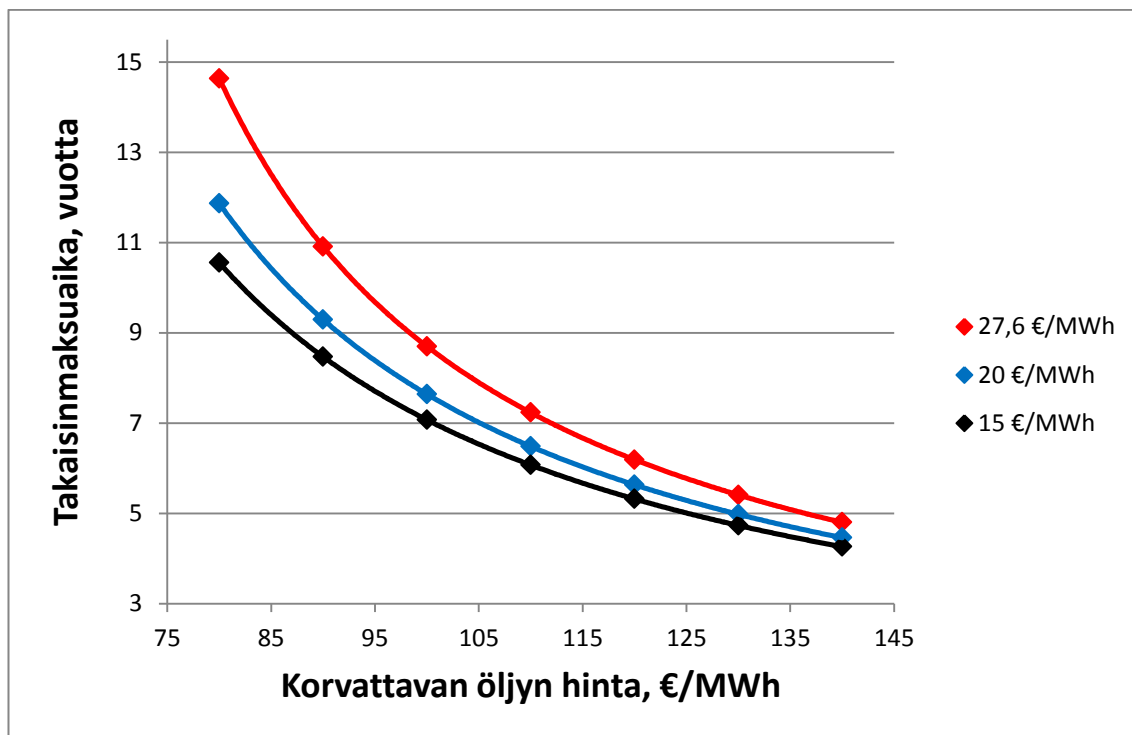
Tässä kappaleessa tarkastellaan KPA-kattilan kesärevision aikaisen lämpökuorman tuottamista sähkökattilalla Rautalammin kaukolämpöverkossa. Revision pituudeksi oletetaan 2 viikkoa ja se oletetaan tehtävän heinäkuun kahden viimeisen viikon aikana. 500 kW:n sähkökattila olisi keskimäärin korvannut mallinnuksen perusteella öljyn käyttöä 216 MWh ja 400kW:n kattila 181 MWh.

Kuten kappaleessa 3.7 mainittiin, sähkökäyttöisen lämpökeskuksen investointikustannukset aiheutuvat lämmityskattilasta, asennuksista, sähköverkon liittymismaksusta ja liittymisjohdon rakentamiskustannuksista. Rautalamille arvioitavan 500 kW:n lämmityskattilan hinta on noin 10 000 €. Liittymisjohdon rakentaminen maksaa noin 15 000 €. 400 kW:n kattilalle vastaaviksi arvoiksi arvioitiin 9000 € ja 13 000 €. Asennuskustannuksiksi molemmille kattiloille arvioitiin 10 000 €. Suurimmat investointikustannukset aiheutuvat sähköverkon liittymismaksusta. Savon Voiman verkkoalueella yli 200 kW:n käyttäjälle ne ovat 2800 € + 110 €/kW, eli 500 kW:n kattilalle 57 800 € ja 400 kW kattilalle 46 800 €. Yhteensä 500 kW:n sähkökäyttöinen lämpökeskus siis maksaisi 92 800 € ja 400 kW:n kattila 78 800 €, mikäli ne sijoitettaisiin esimerkiksi KPA-lämpökeskuksen tiloihin, jolloin uutta rakennusta ei tarvittaisi.

Tuotettavan lämpöenergian tuotantokustannukset aiheutuvat sähkön pörssihinnasta, siirtomaksusta ja sähköverosta. Siirtomaksun suuruus on 1.4 - 31.10 6,6 €/MWh kello 07 - 22 välisenä aikana ja 5,6 €/MWh kello 22 - 07 välisenä aikana. Sähköveron suuruus on 22,53 €/MWh. Kesäaikaan tuotetun sähköenergian hinta ennen pörssihintaa on siis 28,13 - 29,13 €/MWh riippuen käytön ajankohdasta. Laskentaan käytetään päivä- ja yötariiffien keskiarvoa eli 28,63 €/MWh. Talvikuukausina laskutettava tuntikohtaisesta huipputehosta riippuva hintakomponentti ja korkeammat siirtomaksut laskevat sähkökattiloiden kannattavuutta talvikuukausina. Siirtomaksu kesäajan ulkopuolella on klo.07 - 22 34,6 €/MWh ja klo.22 - 07 15,3 €/MWh. Tehokomponenttia laskutetaan 1.11 – 31.3 välisenä aikana arkipäivisin (maanantai – lauantai) klo.07 - 10 ja 16 - 19 kulutetun tuntikohtaisen korkeimman keskitehon mukaan. Tehomaksun suuruus on 6,55 €/kW, eli 500 kW:n kattilalle sen suuruus olisi 3275 €/kk ja 400 kW:n vastaavasti 2620 €, mikäli kattiloita käytettäisiin edellä mainittuna aikana tunnin ajan täydellä teholla. Sähkökattiloiden käyttäminen varatehon tuottamiseen kesäaikaana voi siis olla taloudellisesti järkevää, mikäli sähkön pörssihinta on alhainen. Talven huipputehon tuotantoon ne eivät vaikuta kannattavilta.

Käytännössä alhainen pörssihinta toteutuu kesällä, kun sähkön kysyntä on alhaista. Kesällä 2015 pörssisähkön keskihinta oli kesäkuussa 21,5 €/MWh, heinäkuussa 27,6 €/MWh ja elokuussa 31,1 €/MWh. Tällöin lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset olisivat olleet kuukausittain 50,13 €/MWh, 56,23 €/MWh ja 59,73 €/MWh. Vertailussa kattiloita simuloitiin käytettävän ainoastaan KPA-

lämpökeskuksen 2 viikkoa kestävä revision aikana heinäkuussa. Takaisinmaksuaika laskettiin molemmille kokoluokille sähkön pörssihinnoilla 27,6 €/MWh, 20 €/MWh ja 15€/MWh. Kattiloiden takaisinmaksuajat olivat lähes yhtä suuret, joten selvyiden vuoksi kuvassa 38 on esitetty vain 500 kW:n sähkökattilan takaisinmaksuajat.



Kuva 38. 500 kW:n sähkökattilan korottomat takaisinmaksuajat erisuuruuksilla sähkön spot-hinnoilla korvattavan öljyn hinnan funktiona

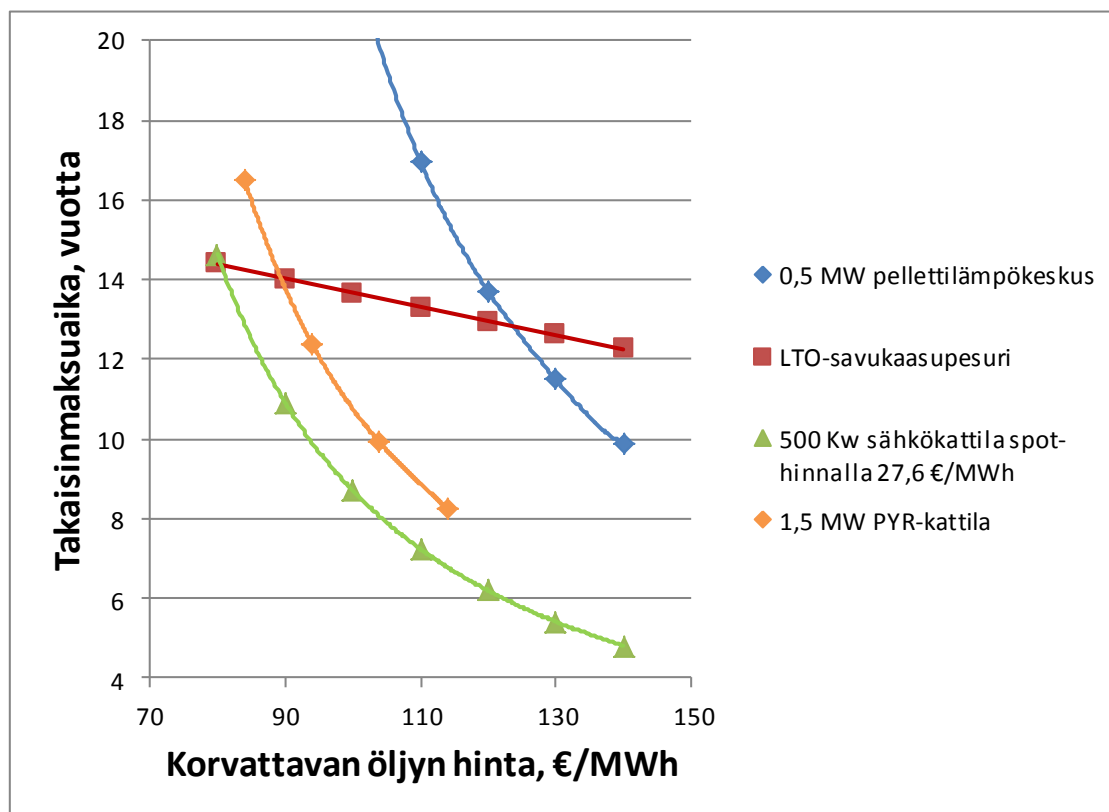
500 kW:n lämpökeskus pääsee kesän 2015 heinäkuun keskimääräisellä 27,6 €/MWh sähkön hinnalla pääoman tuottotavoitteeseen, jos korvattavan öljyn hinta on noin 98 €/MWh. Mikäli Suomen aluehintaero pienenee kappaleessa 3.7 mainituista syistä ja kesän aikainen sähkön hinta putoaa tasolle 20 €/MWh, pääoman tuottotavoitteeseen päästään korvattavan öljyn hinnalla 91 €/MWh. Spot-hinnalla 15 €/MWh tuottotavoite täyttyy öljyn hinnalla 87 €/MWh.

5.9 Yhteenveto kannattavuuksista

Tässä kappaleessa tarkastellaan paikkakuntaakohtaisesti kannattavimpia investointeja suhteessa korvattavan öljyn hintaan. Vertailuun käytetään jälleen suoraa takaisinmaksuaikaa, koska sen avulla pystytään löytämään kannattavin investointivaihtoehto. Edellisistä kappaleista on kerätty kannattavuudet yhteen kuvaajaan vertailua varten. Tekniikoille, joille vertailtiin useita teholuokkia, on vertailuun valittu kannattavimman teholuokan vaihtoehto. Pyrolyysiöljylle on oletettu hinnaksi 54 €/MWh kappaleen 5.4 arvion perusteella.

5.9.1 Rautalammin yhteenveto

Rautalammille vertailtiin pyrolyysiöljylämpökeskusta, pellettilämpökeskuksia, LTO-savukaasupesuria ja sähkökattiloita. Kuvaan 39 on kerätty eri vaihtoehtojen takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan funktiona.

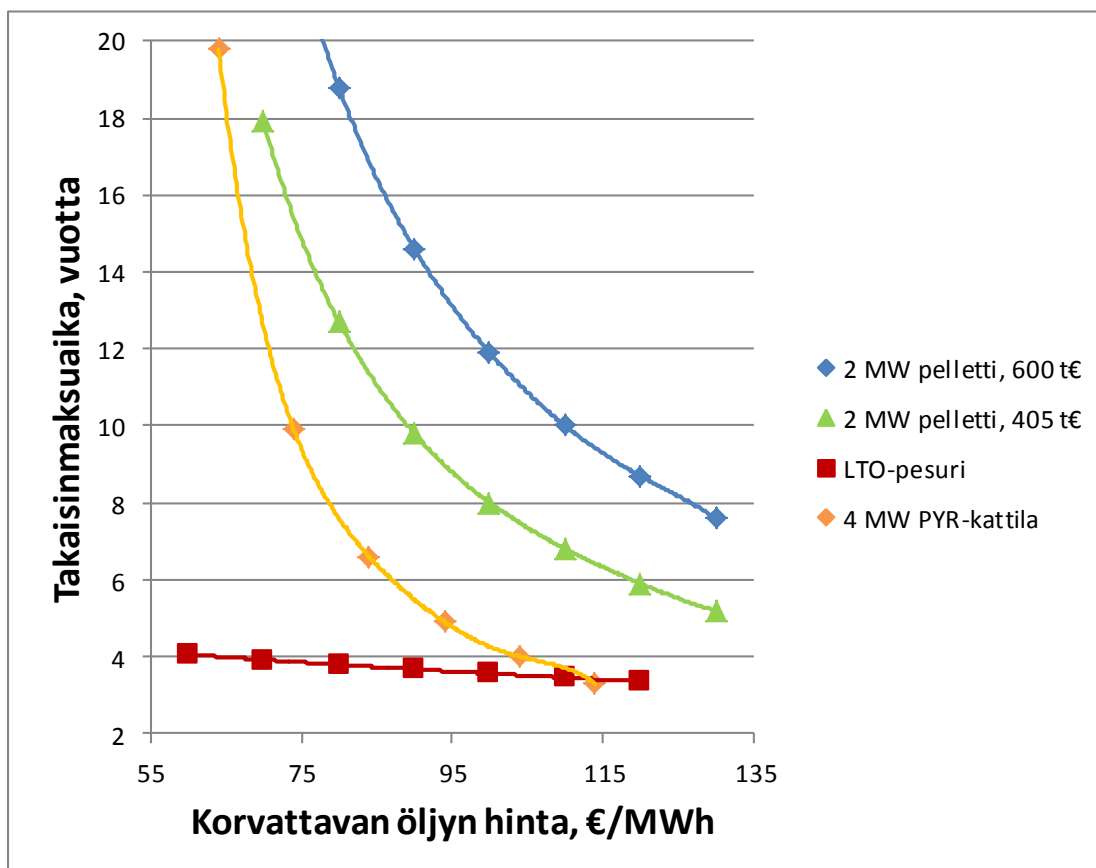


Kuva 39. Yhteenveto eri vaihtoehtojen kannattavuuksista Rautalammin kaukolämpöverkossa

Kuvasta nähdään, että vähäisen öljyn kulutuksen vuoksi suuret investoinnit ovat vähiten kannattavia. Nykyisillä polttoaineiden ja sähkön hinnalla mikään investoinneista ei täytä pääoman tuottotavoitetta. Mikäli öljyn hinta nousee tulevaisuudessa muutaman vuoden takaiselle tasolle ja sähkön hinta pysyy kesäisin alhaisella tasolla tai jopa halpenee, näyttäisi kannattavalta investoida pieniin kaukolämpöverkkoihin sähkökattila KPA-laitoksen kesärevision aikaiselle kuormalle. Myös pyrolyysiöljylämpökeskus kannattaa ottaa mukaan vertailuun, kun haasteet sen käytössä on saatu ratkaistua. Pellettilämpökeskukselle ei tule tarpeeksi käyttötunteja verkossa, jossa on näin suureksi mitoitettu peruskuormalaitos. Myöskään savukaasupesuri ei näytä kannattavalta näin pienessä kokoluokassa.

5.9.2 Kiuruveden yhteenveto

Kiuruvedelle vertailtiin pyrolyysiöljylämpökeskusta, pellettilämpökeskuksia ja LTO-savukaasupesuria. Kuvaajaan 40 on kerätty eri vaihtoehtojen korottomat takaisinmaksuajat korvattavan öljyn hinnan funktiona.



Kuva 40. Yhteenveto eri vaihtoehtojen kannattavuuksista Kiuruveden kaukolämpöverkossa

LTO-savukaasupesuri näyttää hyvin kannattavalta investoinnilta jo nykyisillä polttoaineiden hinnoilla. Pyrolyysiöljylämpökeskus nousee kannattavimmaksi vaihtoehdoksi, jos öljyn hinta kohoaa huomattavasti. Se myös tarjoaisi varakapasiteettia peruskuormalaitoksen häiriötilanteisiin. PYR-öljylämpökeskus myös sijoitettaisiin eri sijaintiin kuin KPA-lämpökeskukset, jolloin se laskisi toimitushäiriöiden riskiä verkoston vikatilanteissa. Kuvan mukainen huomattava öljyn hinnan nousu lähivuosina ei kuitenkaan näytä todennäköiseltä. Suositeltavin investointi tällä hetkellä on siis LTO-pesuri. Se myös sopii Savon Voiman tavoitteeseen energiatehokkuuden parantamisesta.

5.9.3 lisalmen yhteenveto

lisalmeen vertailtiin vain pellettilämpökeskuksia, joiden oletettiin olevan ajovuorossa ennen jo rakennettua pyrolyysiöljylämpökeskusta. Kannattavimmiksi vaihtoehtoiksi nousivat 2 MW:n lämpökeskukset, joiden kannattavuuden rajaksi saatiin korvattavalle öljylle hinnaksi 113 €/MWh 405 000 € investointikustannuksilla ja 144 €/MWh 600 000 € investointikustannuksilla. Mikäli haasteet pyrolyysiöljyn käytössä saadaan ratkaisua, pellettilämpökeskukset korvaisivat pyrolyysiöljyn käyttöä, joten niihin investoiminen ei olisi kannattavaa. Joka tapauksessa pellettilämpökeskusten kannattavuus vaatisi öljyn hinnan huomattavan nousemisen.

6. MUUT KEHITYSEHDOTUKSET

Tässä kappaleessa käsitellään kehitysehdotuksia, joilla öljyn käyttöä on mahdollista vähentää ilman huomattavan suuria investointeja. Kappaleessa käsitellään polttoaineen laadunhallintaa, kunnossapidon kehittämistä, kaukolämpöverkon lataamista, laitosten ylitehon hyödyntämistä, reductioventtiilin käytön kannattavuuden reunaehtoja, kaukolämpöverkon latvapistemittausten asentamista ja vaihtoehtoista polttoaineensyöttötapaa Iisalmen KPA-laitosten polttoaineen vastaanoton revision ajalle.

6.1 Polttoaineen priimaus

Keskusteluissa käyttöpäälliköiden kanssa on tullut ilmi, että suurin osa laitosten ongelmista ja suunnittelemattomista alasajoista johtuu polttoainelinjan ongelmista, jotka usein aiheuttaa kostean polttoaineen jäätyminen. Tässä työssä polttoaineen priimauksella tarkoitetaan tilanteeseen sopivan polttoaineen saannin turvaamista erityisesti hakelämpökeskuksille. Esimerkiksi erittäin kylmän sään aikaan käytettävän polttoaineen tulisi olla mahdollisimman kuivaa, jotta laitoksesta saadaan mahdollisimman suuri teho ja polttoainelinjan ongelmat vältetään. Polttoaineen kosteudesta puhuttaessa prosentit tarkoittavat veden osuutta koko polttoainerän massasta.

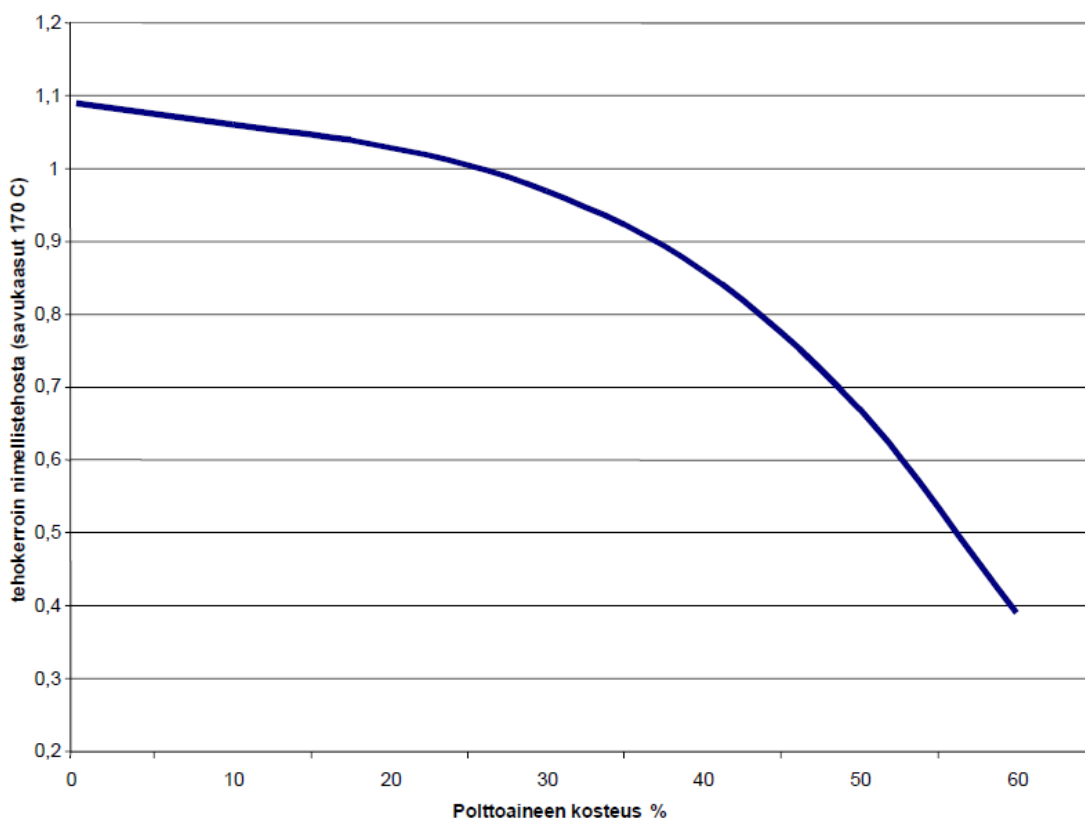
Käytännössä polttoaineen priimauksen voisi toteuttaa esimerkiksi varastoimalla kuivaa haketta tai palaturvetta varastohalliin kesällä, kun parempilaatuista polttoainetta on saatavilla. Polttoaineen varastointi aiheuttaa kuitenkin varsin paljon kustannuksia ja biopolttoaineen laatu voi heikentyä varastoinnin aikana. Tämän vuoksi ainakin lyhyellä aikavälillä kustannustehokkain tapa olisi kehittää toimintaa yhdessä polttoainetoimittajien kanssa, jotta laitoksilla saataisiin hyvälaatuista polttoainetta kun sitä tarvitaan, ja heikompilaatuinen polttoaine käytettäisiin kesäaikaan ja lauhassa talvisäässä, tarvittaessa sekoitettuna parempilaatuisen polttoaineen sekaan. Koska heikompilaatuisia polttoaine-eriä väistämättä saapuu laitoksille myös pakkassäillä, olisi niihin tilanteisiin oltava selkeät toimintamallit, jotta laitoksen toimintahäiriöiltä ja tehonalentumiselta vältytään. Lauhan sään aikaan on jopa toivottavaa että polttoaine on melko kosteaa. Märkä polttoaine on kuivaa edullisempaa, ja LTO-savukaasupesureista saadaan tällöin enemmän tehoa.

6.1.1 Priimauksen tarjoamat hyödyt

Suurin osa Savon Voiman kiinteän polttoaineen lämpökattiloista on suhteellisen pieniä 2 - 8 MW:n arinakattiloita, jotka ovat herkempiä polttoaineen korkealle kosteuspitoisuudelle kuin suuret leijupolttoa hyödyntävät kattilat. Priimatun polttoaineen käyttämisellä voidaan saavuttaa seuraavia etuja [53]:

- Kattilahyötysuhteen nousu
- Suurempi kattilateho
- Helpompi palamisen hallinta
- Pienemmät päästöt
- Kattilan likaantumisen vähentyminen
- Ongelmat polttoainelinjassa vähentyvät

Erityisesti suurempi kattilateho ja polttoainelinjan ongelmien vähentyminen ovat relevantteja diplomityön aiheen kannalta. Kuvassa 41 on esitetty haketta polttavan muutaman megawatin arinakattilan teho nimellistehosta suhteessa polttoaineen kosteuteen. Kuvan kattila on mitoitettu polttoaineelle, jonka kosteus on 25 %



Kuva 41. Polttoaineen kosteuden vaikutus kattilan tehoon. Kuvan kattila on mitoitettu kosteudeltaan 25 % polttoaineelle. Muokattu lähteestä [9]

Savon Voiman kattilat on mitoitettu huomattavasti kosteammalle polttoaineelle kuin kuvan 41 kattila, eikä niillä siten voi edes polttaa erittäin kuivia polttoaineita. Myös

liian kuivat polttoaineet aiheuttavat ongelmia kattiloissa, jotka on mitoitettu kostealle polttoaineelle. Liian kuivalla polttoaineella lämpötila leijukerroksessa tai arinalla voi kohota liian suureksi, jolloin kattila voi vaurioitua.

Syksyllä ja talvella saatavilla olevissa edullisissa polttoaineissa, kuten hakkeessa, kuoressa ja sahanpurussa on usein hyvin korkea vesipitoisuus. Tyypillisesti esimerkiksi Kiuruvedellä talvikuukausina kuoren kosteus on noin 67 % ja sahanpurun noin 60 %. Vaikka näitä sekoitettaisiin hakkeeseen, jonka kosteus on tyypillisesti huomattavasti alhaisempi, näin kostealla polttoaineella lämpölaitoksien teho jää usein noin 90 %:iin nimellistehosta. Ajanhetkinä, jolloin verkon tehontarve on suurempi kuin tämä teho, paremman polttoaineen käytön mahdollistama suurempi teho vähentää suoraan öljykattiloiden käyttötarvetta. Pahimmillaan liian kostea polttoaine voi aiheuttaa kattilatehon hiipumista ja jopa kattilan alasajon. Priimauksen avulla näiltä riskeiltä voidaan välttyä. Laitoksen pihalla sijaitseva polttoainevarasto myös varmistaa polttoaineen saatavuuden jos polttoaineen toimituksessa on vaikeuksia.

6.1.2 Kiinteän polttoaineen varastointi

Lämpölaitoksen käytön kannalta olisi hyödyllistä, mikäli laitoksen yhteydessä tai kohtuullisen matkan päässä polttoaineterminaalissa olisi saatavilla hyvälaatuista polttoainetta tilanteisiin, jolloin sille on tarve. Tällaiseen käyttöön parasta olisi polttoaine, jonka ominaisuudet eivät kärsi varastoinnin aikana ja jota voisi säilyttää polttoainekentällä ilman ylimääräisiä toimenpiteitä. Kivihiili täyttää nämä vaatimukset melko hyvin, mutta ei polttoaineena sovellu Savon Voiman strategiaan, jonka mukaan kotimaisten polttoaineiden osuutta energiantuotannossa tulisi lisätä. Tämän lisäksi kivihiiltä pystyvät käyttämään polttoaineenaan vain Iisalmen ja Pieksämäen leijukattilat, ja niillekin kivihiili aiheuttaa ongelmia liian korkean palamislämpötilansa takia. Puuperäisiä polttoaineita voidaan säilyttää polttoainekentällä, mutta niiden ominaisuudet kärsivät syksyn ja talven aikana niiden imiessä itseensä kosteutta ja mikrobitoiminnan aiheuttaessa kuiva-ainehäviöitä. Pelletit säilyttävät laatunsa hyvänä pitkään, mutta vaativat varastointiin siilon. Turvetta polttoaineenaan käyttäville laitoksille paras primauspolttoaine on hyvälaatuinen jyrshinturpe tai palaturpe edullisen hinnan vuoksi sekä siksi, että niiden laatu pysyy hyvänä säilytyksen aikana. Jyrshinturpeen säilyttäminen laitosalueella on kuitenkin ongelmallista pölyämisen takia. Savon Voimalla polttoainetta ei juuri varastoida laitosalueella, koska useimpien KPA-lämpökeskuksien alueella tähän ei ole tarvittavia varastoalueita. Poikkeuksen tähän tekee Pieksämäen voimalaitos, jonka pihalla sijaitsevalle varastokentälle on tehty hakeauma muutamana talvena.

Yleensä hake säilytetään lämpö- tai voimalaitoksen pihalla suuressa kasassa eli aumassa. Aihetta on tutkittu jonkin verran, mutta tuloksien yleistäminen on vaikeaa johtuen suuresta muuttujien määrästä. Varastoitaessa auman sisäosa alkaa lämmetä heti kasan muodostumisen jälkeen mikrobitoiminnan johdosta. Hake johtaa varsin huonosti

lämpöä, joten lämpötila voi nousta jopa 50 °C:een, jonka jälkeen olosuhteet mikrobien toiminnalle vaikeutuvat. Joskus tämä lämpötila kuitenkin riittää kiihdyttämään kemiallisia palamisreaktioita niin paljon, että auma voi syttyä spontaanisti palamaan, mikäli lämpö ei johdu pois aumasta tarpeeksi nopeasti ja olosuhteet ovat syttymiselle otolliset. Itsesyttymisen riskiä kasvattaa korkea auma, heterogeeninen materiaali, suuri kosteuspitoisuus, pieni partikkelikoko ja ravinnepitoiset kasvinosat kuten lehdet, neulaset ja kuori. [54]

Sateet ja sisäosien mikrobitoiminnan haihduttaman vesihöyryn tiivistyminen auman kylmempiin ulko-osiin aiheuttaa kosteuspitoisuuden nousua auman ulkoreunoilla. Sisäosien kosteuspitoisuus sen sijaan laskee säilytyksen aikana. Kesän sääoloissa hakekasan keskimääräinen kosteuspitoisuus voi hieman laskea, mutta syksyllä ja talvella se normaaleissa sääolosuhteissa nousee. Auman sisäosien hake olisi tällöinkin kelvollista priimaukseen, mutta ulko-osien kosteus nousee talvikuukausina yli 50 % kokonaismassasta mitattuna. Kuiva-ainehäviöt ovat suurimmillaan varastoinnin alkuvaiheessa ja pienenevät ajan kuluessa. Riippuen polttoaineen laadusta ja säilytysolosuhteista kuiva-ainehäviöiden on raportoitu olevan 1 - 4,8 % kuukaudessa. Toisaalta mikäli kosteuspitoisuus laskee, polttoaineen energiasisältö ei välttämättä kärsi kuiva-ainehäviöistä huolimatta. [54]

Rankapuu säilyy oikeaoppisesti pinottuna huomattavasti parempilaatuisena kuin hake, mutta vaatii hakettimen lämpölaitokselle kun polttoainetta halutaan käyttää. Talvella hakettimia käytetään paljon, joten sellaisen paikalle saaminen tarvittaessa voi olla vaikeaa ja kallista. Oman hakettimen ostaminen taas on varsin suuri investointi. Hakettaminen myös vaatii ympäristöluvan, jota on jo aiemmin haettu Pieksämäen voimalaitokselle, mutta sitä ei saatu.

Hyvälaatuisen, kosteudeltaan noin 30 % hakkeen varastointi katokseen kesäkuukausina ratkaisisi monta aumavarastoinnin ongelmaa. Kuivassa hakkeessa mikrobitoiminta on vähäisempää, joten kuiva-ainehäviöt ovat oleellisesti alhaisemmat. Varastoon kannattaisi ostaa hyvälaatuista runkopuusta tai rangoista valmistettua haketta. Myös itsesyttymisriski pienenee, ja sateelta suojattuna hakkeen kosteuspitoisuus laskee vielä syyskuukausinakin. Toisaalta varastoitavat tilavuudet ovat suuria, joten varastohalli on investointina suuri. Esimerkiksi 30*15*5 m varastohalli, johon haketta voisi pystyä varastoimaan noin 900 m³ eli 700 MWh, maksaisi saadun budjettitarjouksen mukaan 61 000 € + LVIS työt ja suojaseinät. Kokonaisuudessaan hinta kohoaisi todennäköisesti ainakin noin tasolle 100 000 €. Lisäksi varaston aktiivinen hyödyntäminen vaatii käyttöön pyöräkuormaajan tai vastaavan työkonetta joka aiheuttaa kustannuksia. Varastohallin tarjoamien kustannussäästöjen arviointi on vaikeaa, mutta vaikuttaa siltä että ne ovat liian suuria investointeja polttoaineiden laadunvaihtelusta johtuvien ongelmien vähentämiseen.

6.1.3 Toiminnan kehittäminen yhdessä polttoainetoimittajien kanssa

Ongelmat polttoainelinjassa talven pakkassäillä ovat erittäin yleisiä, ja kuivan polttoaineen toimittaminen tällöin vähentäisi polttoainesiilojen niin sanottua holvaamista. Tällä tarkoitetaan polttoaineen jääymistä, jolloin se tarttuu polttoainesiilon seiniin eikä putoa polttoaineenkuljettimille. Tällöin polttoaineen syöttö katkeaa. Holvien rikkomiseen ei ole vakiintunutta yleistä toimintatapaa, vaan ne rikotaan joko lihasvoimalla rautakankea apuna käyttäen tai kutsumalla paikalle esimerkiksi kaivinkone. Ongelmia aiheuttavat myös kamit, eli jäätyminen vuoksi suureksi palaksi liimautuneet puupolttoainekimpaleet. Esimerkiksi Leppävirran hakelämpökeskuksen polttoainesiilot on varustettu seinien ja pohjan lämminvesikierrolla, jonka toivotaan vähentävän ongelmia. Laitos on kuitenkin melko uusi eikä käyttökokemuksia toimivuudesta ole vielä tarpeeksi toiminnan arvioimiseksi.

Hakkeen käyttö lämpö- ja voimalaitospolttoaineena on varsin tuore toimiala, joten hakkeen tuotannossa ja logistiikassa on vielä runsaasti kehitettävää. Edistystä on viime vuosina tapahtunut paljon, mutta liian kosteat polttoaineet aiheuttavat vieläkin paljon ongelmia erityisesti kireiden pakkasten aikaan. Vuonna 2011 aloitettiin Itä-Suomen yliopiston, Ilmatieteen laitoksen, Karelia ammattikorkeakoulun ja metsäntutkimuslaitoksen LAAVA-hanke, jossa oli tavoitteena tutkia metsäbiomassan laadun muutoksia suhteessa sään ja mikroilmaston muutoksiin. Tavoitteena oli luoda malli, jonka avulla esimerkiksi ranka- tai korjuutähdekanan kosteutta pystyttäisiin arvioimaan ja siten toimittamaan polttoaineen käyttäjille optimaalisia polttoaineita tilanteen mukaan. [55]

Polttoaineen laadun ennustavassa mallissa on kuitenkin paljon muuttujia, joten mallien avulla tuskin pystytään täysin estämään huonolaatuisten polttoaineiden pääymistä laitoksille väärään aikaan. Haketettava polttoainekasa voi myös olla hyvälaatuista vielä tienvarsivarastossa, mutta esimerkiksi kasan päälle kertynyt irtolumi voi kastella polttoaineen haketuksen aikana. Tällaisissa tilanteissa korostuu kuljetusyrittäjän toiminta. Selvästi huonolaatuinen polttoaine-erä tulisi mahdollisuuksien mukaan toimittaa laitokselle, jossa polttoaineen laadun merkitys on pienempi. Mikäli tämä ei ole mahdollista, kuorma tulisi purkaa lämpökeskuksen pihalle eikä polttoainesiiloon, mikäli laitoksen alueella on tilaa polttoainekasoille. Laitoksille tulisikin mahdollisuuksien mukaan asfaltoida polttoaineelle säilytystilaa. Mikäli polttoaine ei ole ensi näkemältä huonolaatuista, mutta kuormaa purettaessa havaitaan sen sisältävän kameja, tulisi loppukuorma jättää purkamatta polttoainesiiloon. Jos tähän ei ole mahdollisuutta, kuljetusyrittäjillä täytyisi olla esimerkiksi lähialueen kaivinkoneyrittäjän yhteystiedot, jotta tämä voi tulla rikkomaan kamit, ennen kuin ongelmia aiheutuu. Kuljetusyrittäjiä tulisi perehdyttää heidän merkityksestään polttoaineen laadunvalvonnassa, ja luoda selkeät toimintatavat eri tilanteisiin. [56]

Polttoaineen laadun vaihtelu on metsäenergiaa käytettäessä normaalia, ja siihen tulisi reagoida hyvissä ajoin ennen kuin se aiheuttaa ongelmia laitoksen käytössä. Jokaiselle kiinteän polttoaineen lämpökeskukselle tulisi kartoittaa lähialueen koneyrittäjät ja luoda sopimukset kaluston hyödyntämiseksi polttoaineen varastokasojen siirtämiseen pihavarastossa sekä holvien ja kamien rikkomiseen jo ennen ongelmien ilmaantumista. Lisäksi Savon Voiman ja polttoainetoimittajien välillä tulisi olla aktiivista yhteydenpitoa ja mahdollisesti myös kehityspalavereita, joissa ongelmista keskusteltaisiin ja etsittäisiin parempia toimintatapoja. [56]

6.2 Kunnossapidon tehostaminen

Laiterikoista johtuvat tuotantolaitosten suunnittelemattomat alasajot voivat erityisesti talvikuukausina aiheuttaa suuren piikin kaukolämpöverkon öljyn käytössä. Viime vuosina laitosten käytettävyyttä on onnistuttu tuotantopäälliköiden mukaan pitämään korkealla tasolla, mutta kehitettävää käytettävyyden parantamisessa tietenkin on. Tämän työn puitteissa ei ole mahdollista paneutua syvällisesti esimerkiksi huoltoaikataulujen optimointiin, mutta on hyödyllistä kiinnittää huomiota seikkoihin jotka toistuvasti nousevat esille keskusteluissa Savon Voiman henkilöstön kanssa. Tällaisia asioita ovat olleet revisioiden parempi valvonta ja Wisemaster-kunnonhallintajärjestelmän tehokkaampi hyödyntäminen.

Revisioiden kehittämiseen liittyen keskusteluissa laitoshenkilökunnan kanssa on noussut esiin, että ulkopuolisen työvoiman tekemiä huoltotöitä täytyisi valvoa tarkemmin laadukkaan työtuloksen varmistamiseksi. Kesä on lämpölaitosalihankkijoille sesonkiaikaa, koska tuotantolaitosten alasajot ajoittuvat mahdollisimman lämpimien ulkolämpötilojen ajalle. Tällöin alihankkijoiden kokeneimmat työntekijät ovat erittäin kiireisiä ja huoltotöitä toteuttamassa on myös vähemmän kokenutta työvoimaa ilman kokenutta ohjausta. Keskusteluissa Savon Voiman laitoshenkilökunnan kanssa on tullut ilmi tapauksia, joissa revisiotyöt on tehty ammattitaidottomasti. Pahimmassa tapauksessa huonosti toteutetusta revisiosta voi seurata tuotantolaitoksen alasajo talvella, jonka aikana tarvittava lämpö joudutaan tuottamaan öljykäyttöisillä varalämpökeskuksilla. Niinpä työn jälki pitäisi pyrkiä tarkastamaan säännöllisesti ja harkita myös alihankkijoiden vaihtamista mikäli ongelmia ilmaantuu toistuvasti.

Savon Voimalla on ollut laitosten kunnonhallintaan käytössä WiseMaster – kunnonhallintajärjestelmä kirjoitushetkellä noin 1,5 vuotta. Huolto-ohjeiden ja laitedokumenttien lisääminen palveluun on kuitenkin vielä kesken. Lisäystahtia tulisi mahdollisuuksien mukaan nopeuttaa, koska oikein käytettynä se toisi järjestelmällisyyttä huoltotoimintaan ja helpottaisi päivittäistä huoltotyötä, kun laitteiden huolto- ja käyttöohjeet olisivat kaikkien saatavilla helposti ja nopeasti. Jo pidempään laitteita huoltaneet työntekijät tuskin hyötyisivät usein ohjeista, mutta uudelle työvoimalle ne olisivat erittäin hyödyllisiä. Näin saataisiin talteen ”hiljaista

tietoa” joka esimerkiksi helpottaa uuden laitoksenhoitajan perehdyttämistä kun vanha työntekijä jää eläkkeelle tai vaihtaa työnantajaa.

Myös laitekohtaisten vika- ja huoltokorjausten raportointi vaatii tehokkaampaa hyödyntämistä. Erityisesti tämä on ongelma ulkopuolisen työvoiman toteuttamissa huoltotoissa. Tarkasti dokumentoidun huoltohistorian avulla päästäisiin ajan myötä käsiksi laitteiden vikataajuuksiin, joiden perusteella pystyttäisiin määrittelemään laitteille ja komponenteille optimaaliset huolto- ja vaihtovälit. Lisäksi huomattaisiin esimerkiksi eri valmistajien välisiä laatueroja, ja pystyttäisiin hyödyntämään tätä tietoa kilpailutustilanteissa. Tilastoista huomattaisiin myös eri laitosten ja alueiden välisiä eroja komponenttien kestävyudessa ja pystyttäisiin ottamaan tämän perusteella käyttöön parhaat toimintatavat koko Savon Voiman alueella. Wisemasteriin täytyisi myös lisätä käyttötunteihin perustuvat huoltosuunnitelmat ja automaattiset työmääräykset, eli huoltohenkilökunnalle tulisi automaattisesti ohjeet laitteen tai komponentin tarkastamisesta ja huoltamisesta laitoksen käyttötuntien perusteella.

6.3 Verkon lataaminen

Kaukolämpöverkon lataamisella tarkoitetaan ajotapaa, jossa verkkoon varastoidaan lämpöenergiaa nostamalla menolämpötilan taso korkeammaksi kuin ulkolämpötila edellyttäisi. Menetelmällä voidaan korvata öljyn käyttöä kiinteällä polttoaineella tilanteissa, joissa verkon tehon tarve nousee korkeammalle kuin kiinteän polttoaineen lämmöntuotantolaitosten maksimiteho. Verkkoon varastoitunutta energiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi aamun lämpimän käyttöveden kulutuksen lisääntymisen aiheuttaman tehopiikin kattamiseen. Tehopiikin aikana korkeampaan lämpötilaan ladatun kaukolämpöverkon lämpötila laskee takaisin normaalille tasolle lämmön kulutuksen ollessa tuotantoa suurempaa. Toisaalta lataaminen aiheuttaa kustannuksia lisääntyvien lämpöhäviöiden ja lämpötilan muutosten aiheuttamien verkostorasitusten kautta. Verkon lataaminen on kuitenkin kannattavaa, mikäli sillä vältetään huomattavasti kalliimman energianlähteen, kuten öljyn, käyttöä ja liian suuret verkostorasitukset vältetään noudattamalla lataamisessa kaukolämpöputkien valmistajien ohjeita. Kaukolämpöverkon lataamisessa on otettava huomioon myös kaukolämpöverkon menolämpötilan maksimiarvo 120 °C.

Tällä hetkellä verkon lataamista suoritetaan Savon Voimalla vaihtelevasti eri verkoissa. Erityisesti suurissa verkoissa lataamista tehdään säännöllisesti, mutta pienemmissä verkostoissa sitä ei läheskään aina hyödynnetä. Pienemmille kaukolämpöverkoille tulisikin luoda automatisoitu latausohjelma, jonka operaattori voi kytkeä päälle sääennusteen perusteella. Ohjelma kytkettäisiin päälle esimerkiksi illalla, kun sääennusteen mukaan KPA-lämpökeskuksen teho ei riitä seuraavan aamun kulutuspiikin aikaisen tehon tuottamiseen. Tällöin automaatio hoitaisi verkoston menolämpötilan korottamisen aamuyön aikana.

Lasketaan kustannussäästöt Kiuruveden kaukolämpöverkossa, jos sen kaukolämpöverkkoa ladattaisiin lämmittämällä verkoston vettä 10 °C yli ohjearvon yön aikana aamupiikin kulutuksen kattamiseksi. Verkoston vesitilavuus on 443 m³. Verkostoon varastoituneeksi ”ylimääräiseksi” lämpömääräksi saadaan yhtälöllä 3 noin 5 MWh olettamalla varastoinnin hyötysuhteen arvoksi 0,85 ja tilavuushyötysuhteen arvoksi 1. Varastoinnin hyötysuhde 85 % tarkoittaa, että 15 % ladatusta lämmöstä menetetään verkoston korkeamman lämpötilan aiheuttamien korkeampien lämpöhäviöiden takia. Oletetaan jälleen kiinteän polttoaineen hinnaksi 20 €/MWh ja korvattavan öljyn hinnaksi 60 €/MWh. KPA-laitoksen kattilahyötysuhteeksi arvioidaan 85 % ja öljylämpökeskuksen 90 %. Tällöin latauksen avulla saavutettava kustannussäästö on yhdellä latauskerralla noin 190 €, mikäli kaikki ladattu lämpö korvaisi öljylämpökeskuksen tuotantoa.

Jos arvioidaan että vuodessa lataamisen mahdollistavia tilanteita olisi 20 kpl, vuotuinen säästöpotentiaali Kiuruveden verkostossa olisi noin 3600 €. Summa ei ole kovin merkittävä, mutta latausohjelman hankkiminen maksaisi vain maksimissaan muutamia tuhansia euroja ja kerran hankittua ohjelmaa voisi käyttää myös muissa kaukolämpöverkoissa [57]. Verkkoa tulisikin ladata myös pienissä kaukolämpöverkoissa ja hankkia lataamisen apuvälineeksi automatisoitu latausohjelma.

6.4 Laitosten ajaminen yliteholla

Jokainen voima- ja lämpölaitos on mitoitettu tietylle maksimiteholle. Hyvälaatuisella polttoaineella laitoksilla on kuitenkin mahdollista tuottaa myös huomattavasti mitoitustehoa suurempia tehoja. Tällöin kuitenkin komponenttien kuluminen on huomattavasti normaalia nopeampaa ja suurilla ylitehoilla on mahdollista myös vaurioittaa esimerkiksi arinarautoja ylikuumenemisen seurauksena. Yliteholla ajaminen voi kuitenkin olla kannattavaa, jos sillä vältetään polttoöljyn käyttöä ja ylitehoa otetaan vain maltillinen määrä suhteessa mitoitustehoon. [28]

Tällä hetkellä ylitehon käyttämistä hyödynnetään vaihtelevasti Savon Voiman tuotantolaitoksilla. Käyttöpäälliköille tehdyn kyselyn mukaan suurimmassa osassa laitostantaa ylitehoa ei juuri käytetä. Kattiloiden kestävyys ylitehoajossa vaihtelee kattilatyypeittäin ja eri valmistajien välillä, joten on vaikeaa antaa yleispätevää suositusta ylitehojen hyödyntämisestä. Tämän lisäksi aiheesta on saatavilla niukasti tutkimustietoa erityisesti pienessä kokoluokassa. Tämän takia lisääntyneelle kattilan kulumiselle on erittäin vaikeaa arvioida kustannuksia. Tämän takia työssä ei voida suositella ainakaan huomattavan ylitehon hyödyntämistä.

6.5 Reduktioventtiilin hyödyntäminen

Reduktioventtiiliä käytetään voimalaitoksissa tulistetun höyryn paineen alentamiseen ja höyryn ohjaamiseen turbiinin ohi lauhduttimeen tai kaukolämmönvaihtimeen. Sitä voidaan käyttää myös turbiinin rinnalla käynnistys- ja ylikuormitustilanteissa. Sitä käytetään myös turbiinin vikatilanteissa, jotta tarvittava kaukolämpöteho pystytään tuottamaan. Reduktioventtiiliä käyttämällä menetetään mahdollisuus tuottaa korkeampi-arvoista energiaa, eli sähköä, mutta se voi olla kannattavaa tietyillä reunaehdoilla.

Mikäli voimalaitos toimii osakuormalla, lämmön tuotantoa voidaan lisätä kattilan tehoa nostamalla, jolloin myös sähköteho nousee. Kun voimalaitos toimii nimellisteholla, lämmöntuotantoa voidaan nostaa ajamalla kattilaa yliteholla ja ohjaamalla ylimääräinen syntynyt höyry reductioventtiilin kautta kaukolämmönvaihtimelle. Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, kattiloiden käyttämistä yliteholla ei kuitenkaan voida tämän työn puitteissa suositella. Toinen mahdollisuus on käyttää voimalaitosta nimellisteholla ja ohjata osa syntyneestä höyrystä reductioventtiilin kautta kaukolämmön tuotantoon. Tällöin menetetään sähkön myynnistä saatavat tulot, mutta säästetään lämmöntuotannossa huipputuotantolaitoksen muuttuvien kustannusten verran, mikäli kaukolämpöverkon tehon tarve on suurempi kuin verkkoon kytkettyjen KPA-laitosten yhteisteho.

Ajamalla kaikki höyry turbiinin läpi saadaan tuotettua sähköä, joka voidaan myydä pohjoismaisessa sähköpörssissä ja saada siitä joka tunnille muodostuvan Spot-hinnan verran myyntituloja. Lisäksi puulla tuotetulle sähkölle on olemassa tuotantotuki, jonka suuruus määräytyy yhtälön 7 mukaisesti:

$$T = 35,65 - 1,824V_t - 1,358P_o. \quad (7)$$

Yhtälössä T [€/MWh] on metsähakkeen tuotantotuen suuruus, V_t turpeen vero [€/MWh] ja P_o päästöoikeuden hinta [€/t,]. Turpeen vero on tällä hetkellä 3,4 €/MWh. Yhtälössä päästöoikeuden minimiarvo on 10 €/t, eli jos hinta on alle tämän, tuotantotuen suuruus on 15,87 €/MWh. Tällä hetkellä päästöoikeuden hinta on noin 8 €/t, eli jos puun osuus käytetyistä polttoaineista on 25 %, tuotantotuki on 3,97 €/MWh. [58]

Hyödyntämällä reductioventtiiliä menetetään osa sähkötehosta mutta saadaan tuotettua lämpöä edullisemmin kuin öljykäyttöisillä huippukuormalaitoksilla. Tällöin säästöä syntyy käytettävän polttoöljyn muuttuvien kustannusten verran. Näihin kuuluvat polttoaineen hinta ja päästöoikeuksien hankinnasta aiheutuvat kustannukset. Lisäksi on otettava huomioon öljykattiloiden hyötysuhde, joka on noin 90 %.

Reduktioventtiiliä on siis kannattavaa hyödyntää, jos sillä voidaan välttää öljylämpökeskusten käyttämistä ja sähkön Spot-hinnan ja tuotantotuen summa on pienempi kuin öljylämpökeskusten muuttuvat tuotantokustannukset. Oletetaan

huipputuotantoon käytettävän raskasta polttoöljyä hinnaltaan 50 €/MWh, öljykattilan hyötysuhteeksi 90 %, päästöoikeuden hinnaksi 8 €/tCO₂ ja raskaan polttoöljyn ominaishiilidioksidipäästökseksi 0,284 t_{CO2}/MWh. Tällöin öljyllä tuotetun lämmön muuttuvat kustannukset ovat 58,1 €/MWh. Jos neljäsosa voimalaitoksen polttoaineista on puuperäisiä, myydylle sähkölle saadaan tuotantotukea edellä mainittu 3,97 €/MWh. Tällöin reduktioajo olisi kannattavaa, mikäli tunnin Spot-hinta olisi alle 54,1 €/MWh.

Laskelmissa ei kuitenkaan otettu huomioon reduktioventtiilin kulumista. Se on yksi kalleimmista virtausteknisistä komponenteista voimalaitoksissa. Käytössä se altistuu suurelle virtaukselle ja paine-erolle, jotka kuluttavat sitä. Käytön aiheuttamien kustannusten arviointi tarkasti on kuitenkin erittäin vaikeaa. Iisalmen voimalaitoksen reduktioventtiili on hinnaltaan noin 70 000 €. Sen käyttöikä on kuitenkin pitkä, noin 20 vuotta, ja sitä joudutaan huoltamaan vuosittain joka tapauksessa. Tästä syystä sen käytön muuttuvat kustannukset eivät todennäköisesti ole kovin merkittävät. Kannattava Spot-rajahinta kuitenkin laskenee joitakin euroja aikaisemmasta laskelmasta reduktioventtiilin kulumisesta aiheutuvien kustannusten johdosta.

Reduktioajoa ei ole juurikaan käytetty Savon Voimalla aiemmin muulloin kuin höyryturbiinin vikatilanteissa. Edellä esiteltujen laskelmien perusteella voidaan suositella reduktioajon käytön lisäämistä, mikäli sen kannattavuuden reunaehdot täyttyvät. Tutkittaessa viime vuosien ulkolämpötila- ja spot-hintatilastoja nähdään, että rajahinta alittuu jo nykyisillä polttoöljyjen hinnoilla usein, vaikka ulkolämpötila olisi alle -20 °C. Tällöin molemmilla voimalaitospaikkakunnilla joudutaan käyttämään öljylämpökeskuksia huipputehon tuotantoon.

6.6 Latvapistemittaukset

Kaukolämpöverkossa on lämpöhäviöitä, joiden johdosta kaukolämpöveden lämpötila laskee sen virratessa verkossa. Latvapistemittauksella tarkoitetaan paine- ja lämpötilamittausta siinä lämmönkäyttöpaikassa, jossa kaukolämpöveden paine-ero on kaikkein alhaisin. Kaukolämpöveden menolämpötilaa ja virtaamaa säädetään tämän asiakkaan kaukolämpöveden paine-eron perusteella. Tällä hetkellä monessa Savon Voiman kaukolämpöverkossa ei ole etäluettavaa latvapistemittausta, vaan menolämpötilaa ja -painetta säädetään kokemuseräisesti. Tällöin menolämpötilaa- ja painetta täytyy pitää varmuuden vuoksi optimaalista suurempina, joka johtaa korkeampaan kaukolämpöveden paluulämpötilaan. Tämä johtaa verkoston suurempiin lämpöhäviöihin, nostaa pumppauskustannuksia ja laskee mahdollisen LTO-savukaasupesurin lämmön talteenoton tehokkuutta kuvan 17 mukaisesti. Suurempi pesurista saatava teho vähentää aina pesurin päällä ollessa kiinteän polttoaineen kulutusta. Hetkinä, jolloin kaukolämpöverkon tehon tarve on suurempi kuin KPA-lämpökeskuksen huipputeho, pesurin suurentunut teho myös vähentää öljykattiloiden käyttötarvetta ja alentaa näin tuotantokustannuksia entisestään. Latvapistemittauksen

avulla myös verkostovuotojen paikantaminen on helpompaa. Tämä parantaa kaukolämmön toimitusvarmuutta ja vähentää vesihävikkiä vuototilanteessa. Tässä työssä arvioidaan säästöjä ainoastaan vähentyneiden lämpöhäviöiden, pumppauskustannusten ja pesurin säästämien kiinteän polttoaineen osalta.

Lasketaan säästöt, mikäli Nilsin kaukolämpöverkkoon saataisiin latvapistemittaus. Nilsin kaukolämpöverkko edustaa keskikokoista verkkoa, jossa on savukaasupesuri mutta ei latvapistemittauksia. Se valittiin vertailun kohteeksi, koska säästöpotentiaalin oletettiin olevan merkittävä. Oletetaan verkoston lämpöhäviöksi ilman mittauksia 10 %, ja mittauksen jälkeen 9,8 %. Pumppauksen sähkönkulutukseksi arvioidaan 3 kWh siirrettyä megawattituntia kohti ja sen oletetaan laskevan 10 % mittauksen johdosta. Lisäksi oletetaan, että alhaisempi paluulämpötila nostaa pesurista saatavaa tehoa keskimäärin 5 %.

Nilsissä käytettiin vuosina 2011 - 2014 keskimäärin 25 600 MWh polttoaineita vuosittain. Mikäli oletetaan kaikkien tuotantomuotojen keskimääräiseksi hyötysuhteeksi 85 %, saadaan kaukolämpöverkkoon syötetyn lämpöenergian määräksi noin 21 800 MWh. Latvapistemittaus alentaisi lämpöhäviöitä tällöin noin 44 MWh. Mikäli tuotetun energian keskimääräinen tuotantokustannus olisi 25 €/MWh, säästöjä syntyisi vuosittain noin 1100 €. Pumppaukseen kuluu sähköenergiaa vuosittain noin 65 MWh ja mittauksen avulla se olisi laskettavissa noin 59 MWh:iin. Sähköenergian hinnalla 80 €/MWh vuosittaiset säästöt olisivat noin 520 €. Mikäli oletetaan vuosittaisesta tuotetusta lämpöenergiasta 90 % tuotetuksi KPA-lämpökeskuksella ja LTO-pesuri tuottaisi tästä 1/6:n, saadaan pesurin tuottamaksi vuosittaiseksi lämpöenergiaksi noin 3300 MWh. Jos latvapistemittaus johtaisi pesurin tuottaman energiamäärän kasvamiseen 5 %:lla, se korvaisi kiinteän polttoaineen käyttöä noin 160 MWh. Jos oletetaan kiinteän polttoaineen keskihinnaksi 20 €/MWh, säästöä syntyisi vuosittain noin 3300€.

Latvapistemittaukset siis säästäisivät Nilsin kaukolämpöverkossa vuosittain yhteensä noin 4900 €. Latvapistemittauksen asentaminen kaikki kulut huomioon ottaen maksaa noin 6000 €. Lisäksi se aiheuttaa kustannuksia noin 300 € vuodessa. Takaisinmaksuajaksi saadaan 1,3 vuotta, eli investointina se olisi erittäin kannattava.

Laskennassa käytetyt oletukset ovat karkeita arvioita, mutta suuruusluokaltaan oikeita. Tuloksista nähdään, että Nilsin kaukolämpöverkkoon olisi mahdollisimman pian saatava latvapistemittaukset. Lyhyen takaisinmaksuajan perusteella voidaan olettaa, että mittaukset kannattaisi asentaa myös kaikkiin muihin Savon Voiman kaukolämpöverkkoihin. Syksyllä 2015 latvapistemittaus puuttuu Kiuruveden, Toivalan, Maaningan, Nilsin, Juankosken, Tahkovuoren ja Joroisen kaukolämpöverkoista. Erityisen tärkeää olisi saada mittaukset verkkoihin, joissa on LTO-savukaasupesuri, koska pesurin kasvanut tuotanto tarjoaa suurimman säästöpotentiaalin. Pienemmissä kaukolämpöverkoissa, joissa ei ole LTO-savukaasupesuria säästöt jäävät pienemmiksi,

mutta mittauksen asentaminen olisi silti todennäköisesti erittäin kannattavaa. Tämänhetkisen suunnitelman mukaan Savon Voiman jokaiseen kaukolämpöverkkoon olisi asennettu mittaukset vuoden 2016 loppuun mennessä.

6.7 Polttoaineen syöttö pyöräkuormaajalla Iisalmessa vastaanoton kesärevision aikana

Iisalmessa voimalaitokselle ja sen yhteydessä olevalle kiinteän polttoaineen lämpölaitokselle on yhteinen polttoaineen vastaanotto, murskaus ja seula. Tämä aiheuttaa sen, että kesällä, kun polttoaineen vastaanotto on huollossa, ei kumpaakaan kiinteän polttoaineen laitosta ole pystynyt ajamaan. Lämpökeskukselle olisi kuitenkin mahdollista syöttää polttoainetta suoraan polttoainesiiloon esimerkiksi pyöräkuormaajalla, jolloin vältettäisiin huollon aikainen öljyn käyttö. Mikäli pyrolyysiöljylämpökeskus saadaan kesään 2016 mennessä toimimaan luotettavasti, voisi tämän ajan tuottaa tehoa myös sillä, mutta kustannussäästöjä verrattuna raskaaseen polttoöljyyn ei tulisi. Suuria investointeja polttoaineen vastaanottoon ei kannata tällä hetkellä toteuttaa, koska KPA-lämpökeskus on tulossa käyttöikänsä päähän noin viiden vuoden kuluttua ja myös polttoaineen vastaanotto uusitaan tällöin.

Polttoaineensyöttö pyöräkuormaajalla olisi teknisesti täysin toteutettavissa, mutta polttoaineen säilyttäminen laitosalueella pihalla voi aiheuttaa pölyhaittoja. Savon Voiman ympäristöasiantuntijan kanssa käytyjen keskustelujen mukaan toiminta olisi mahdollista nykyisen ympäristöluvan puitteissa oikein toteutettuna. Polttoaineeksi tälle poikkeusajalle paras olisi todennäköisesti laadukas hake pölyhaittojen minimoimiseksi. Myös polttoaineen laadun tulisi olla tasalaatuisempaa kuin normaalisti, jotta ylimääräisiltä ongelmilta välttyttäisiin operoitaessa jo valmiiksi poikkeustilanteessa. Myös miehityksen järjestäminen tälle ajalle kesälomakaudella voi aiheuttaa hankaluuksia ja estää osaa työvoimasta osallistumasta revisiotöihin, mutta olisi kuitenkin toteutettavissa.

Polttoaineen vastaanoton huoltotyöt kestävät yhdellä vuorolla toteutettaessa noin 2,5 viikkoa. Kahdessa vuorossa tehtynä huolto lieenee toteutettavissa noin kymmenessä päivässä. Iisalmen kesäkuorma on noin 6 MW, jolloin kymmenen päivän aikana polttoaineenkulutus on noin 1500 MWh. Kaikesta vuoden aikana käytetystä polttoaineesta tämä on noin 0,7 %. Säästöpotentiaali riippuu tulevien kesien polttoöljyjen hinnoista ja huollon aikana valitsevasta säätilasta, mutta jo nykyisillä verrattain alhaisilla öljyn hinnoilla voitaisiin saavuttaa noin 40000 € vuosittaiset säästöt polttoaineen kulutuksessa. Vuoden 2018 alkaen rikkipäästörajat kiristyvät, joka käytännössä johtaa siihen, että öljylämpökeskuksissa siirrytään käyttämään vain kalliimpaa kevyttä polttoöljyä raskaan polttoöljyn sijasta. Tällöin polttoaineensäästöpotentiaali on maltillisillakin lähtöarvoilla noin 60 000 €. Kylmä sää, huollon pitkittyminen ja öljyn hinnan nousu nostavat säästöpotentiaalia vielä tästäkin

suuremmaksi, etenkin jos useampi tekijöistä toteutuu yhtä aikaa. Säästöjä vähentävät tarvittava työkoneen vuokraaminen ja mahdollisesti ulkoisen työvoiman palkkaaminen operoimaan konetta. Kuitenkin säästöpotentiaalia on huomattavasti: mikäli arvioidaan pyöräkuormaajan vuokraamisen ja sen polttoaineen hinnaksi 400 € päivässä ja vuokratyövoiman hinnaksi 30 € tunnilta, kertyy 10 päivän aikana nykyisillä polttoaineiden hinnoilla säästöä noin 29 000€

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityön tavoitteena oli etsiä liiketaloudellisesti järkeviä toimenpiteitä, joilla voitaisiin ennestään vähentää polttoöljyjen kulutusta Savon Voiman kaukolämmön tuotannossa. Työn aluksi esiteltiin kaukolämmön tuotantoon soveltuvia tekniikoita, joilla öljyn käyttöä olisi mahdollista korvata. Näistä valittiin alkuselvityksen perusteella potentiaalisimmat ja niille toteutettiin tarkemmat kannattavuustarkastelut kolmea eri kokoluokkaa edustavissa kaukolämpöverkoissa. Tuloksena saatiin verkkokohtaiset investointisuositukset ja polttoöljyn rajahinnat, joilla eri investointimahdollisuudet muuttuvat kannattaviksi.

Työn loppuun kerättiin muita työtä toteuttaessa esille nousseita kehityskohteita ja toimenpiteitä, joilla on vaikutusta öljyn kulutukseen. Näistä toimenpiteistä Iisalmen KPA-lämpökeskusten polttoaineen vastaanoton huollon aikainen polttoaineen syötön toteuttaminen esimerkiksi pyöräkuormaajalla tarjoaa varsin merkittävän säästöpotentiaalin. Myös latvapistemittausten asentaminen jokaiseen kaukolämpöverkkoon tarjoaa investoinnin hintaan nähden merkittävät vuosittaiset säästöt, ja niiden asentaminen tulisikin toteuttaa mahdollisimman pian. Polttoaineen priimauksesta saavutettavien rahallisten hyötyjen arvioiminen on vaikeaa, mutta toimintatapojen kehitys polttoaineketjussa ja keskustelun lisääminen Savon Voiman ja polttoainetoimittajien välillä tarjoavat huomattavaa säästöpotentiaalia polttoaineeseen liittyvien ongelmien vähentyessä. Bioenergiaa hyödynnettäessä polttoaineiden laadunvaihtelut eivät ole poikkeustilanteita, vaan osa jokapäiväistä toimintaa. Niinpä huonolaatuisten polttoaine-erien varalle on oltava vakiintuneet toimintatavat, jotta ongelmat voidaan välttää jo ennen niiden syntymistä. Työssä tutkittiin myös reduktioventtiilin käytön kannattavuuden reunaehdoja. Reduktioajoa tulisikin hyödyntää nykyistä useammin alhaisten sähkön hintojen ja korkean lämmön kysynnän aikaan.

Rautalammille ei löytynyt kannattavia tuotantolaitosinvestointeja tutkittujen tekniikoiden joukosta nykyisillä polttoaineiden hinnoilla. Pienissä kaukolämpöverkoissa peruskuormalaitokset on mitoitettu suuriksi, joten öljyn kulutus on jo valmiiksi varsin alhaisella tasolla ja korvausinvestoinnin käyttömäärät jäisivät liian pieniksi säästääkseen pääomakustannuksensa edullisemman polttoaineen kautta. KPA-lämpökeskus on myös liian pieni kokoluokaltaan, jotta LTO-savukaasupesuri olisi kannattava investointi nykyisillä polttoaineiden hinnoilla. Mikäli polttoöljyn hinta nousee tasolle 100 €/MWh ja tilanne näyttää pysyvältä, on syytä tutkia sähkökattilaan tai pyrolyysiöljylämpökeskukseen investoimista. Vaihtoehtojen kannattavuuteen vaikuttavat sähkön hintakehitys, verkon tehontarpeen kehittyminen sekä pyrolyysiöljyn laatu- ja hintakehitys ja edistysaskeleet sen lämpökeskuskäytössä.

Kiuruveden kaukolämpöverkkossa kannattavimmaksi investointikohteeksi nousi LTO-pesuri. Keskimääräisenä vuonna se korvaisi öljyn käyttöä noin 700 MWh. Korolliseksi takaisinmaksuajaksi saatiin 4,9 vuotta, joten investointia voidaan pitää hyvin kannattavana. Lisäksi LTO-pesuri sopii Savon Voiman strategiaan, jonka mukaan lämmön tuotannon hyötysuhdetta pyritään parantamaan. Pyrolyysiöljylämpökeskus ei ole kannattava nykyisillä polttoaineiden hinnoilla, mutta ei vaadi ennennäkemättömiä polttoöljyn hintoja ollakseen kannattava investointi. LTO-pesuri on kuitenkin takaisinmaksuajaltaan ylivoimainen, jo koeteltua tekniikkaa ja sopii paremmin strategiaan, joten sitä voidaan pitää parempana investointina.

Iisalmeen on jo rakennettu pyrolyysiöljylämpökeskus ja LTO-pesurin valmistuessa vuoden 2015 lopussa huippukuormalaitosten käyttötarve alenee muutenkin erittäin pieneksi. Niinpä kannattavien investointien löytäminen Iisalmen kaukolämpöverkkoon on vielä haastavampaa kuin muille vertailupaikkakunnille. Ehdottomasti kannattavin työssä esitetty toimenpide Iisalmissa on keskikuormalaitoksen käynnissä pitäminen polttoainetta pyöräkuormaajalla syöttäen polttoaineen vastaanoton revision aikana. Keskimäärin revision aikana on kulunut raskasta polttoöljyä noin 1500 MWh eli 0,7 % vuosittaisesta polttoaineenkulutuksesta.

Pellettikäyttöisten lämpökeskusten kannattavuus oli vertailussa ennakko-odotuksia huonompi. Mikäli verkostossa on runsaasti öljyn kulutusta, savukaasupesurin kannattavuus on huomattavasti pellettilämpökeskuksia parempi. Mikäli öljyä kuluu vähän, pyrolyysiöljylämpökeskus on pellettikäyttöistä vaihtoehtoa kannattavampi pienempien investointikustannustensa johdosta. Myös sähkökattilat nousivat vertailussa samasta syystä pellettilämpökeskuksia paremmaksi investointikohteeksi.

Lämpöpumpuille ei löytynyt käyttöä tutkituilla paikkakunnilla. Lämpöpumput soveltuvatkin paremmin perus- ja keskitehon tuotantoon suurehkojen investointikustannuksiensa ja kohtalaisen alhaisten muuttuvien kustannustensa takia. Suunniteltaessa uusia perus- ja keskikuormalaitosinvestointeja, tulisikin kartoittaa verkon läheisyydessä sijaitsevat hukkalämmön lähteet ja vertailla myös lämpöpumppuratkaisuja. Huippu- ja varatehon lähteiksi ne ovat liian suuria investointeja.

Aurinkolämmöllä ei nähty olevan potentiaalia öljyn käytön vähentämisessä. Pääomakustannukset huomioiden aurinkolämmön hinta on huomattavasti kalliimpaa kuin kiinteällä polttoaineella tuotettu lämpö. Koska aurinkolämpöä on saatavilla ainoastaan lämpimänä vuodenaikana, aurinkolämpö korvaisi öljyn käyttöä ainoastaan KPA-laitoksen kesärevision aikana. Tällekin ajalle aurinkolämpöjärjestelmä vaatisi lämpötilan priimauksen jollain muulla tuotantomuodolla tai mittavan kokoisen lämpövaraston.

Loppupäätelmänä voidaan todeta, että suurimmassa osassa Savon Voiman kaukolämpöpaikkakunnista öljyä kuluu vuosittain niin vähän, että sen markkinaehtoinen korvaaminen muilla tuotantotavoilla ei nykyisillä polttoaineiden hinnoilla kannata. Tähän poikkeuksen tekee Kiuruveden kaukolämpöverkko, jossa öljyn käyttöä huippukuorman tuottamiseen on mahdollista vähentää jo nykyisillä polttoaineiden hinnoilla huomattavasti LTO-savukaasupesurin avulla. Muilla paikkakunnilla öljyn käytön vähentämismahdollisuudet rajoittuvat lähinnä jo olemassa olevan laitekannan käytön optimointiin.

8. LÄHDELUETTELO

1. Savon Voima Oyj. Savon Voima Oyj yritysesittely. [Online].; 2015 [Viitattu 14. 9. 2015].
Saataavissa: <http://www.savonvoima.fi/Yritysesittely/Sivut/yritysesittely.aspx>.
2. Savon Voima Oyj. Vuosikertomus 2014. ; 2014.
3. Nousiainen I, Heikkinen M. Savon Voima Oyj:n Bioenergiaohjelma. Savon Voima Oyj, VTT; 2001.
4. Ilmatieteenlaitos. Vuoden 2014 säät. [Online].; 2015 [Viitattu 26. 10. 2015].
Saataavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2014>.
5. Koskelainen L, Saarela R, Sipilä K. Kaukolämmön käsikirja Helsinki: Energiategollisuus ry; 2006.
6. Makkonen P. Huonolaatuisten polttoaineiden poltto leijukattiloissa. Foster Wheeler Energia Oy; 2000.
7. Raiko R, Saarenpää I. Höyrytekniikka. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto; 2014.
8. KPA Unicon Oy. Unicon Biograte. [Online].; 2015 [Viitattu 20. 10. 2015].
Saataavissa: http://www.kpaunicon.com/fi/unicon_biograte.
9. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Hakelämpökeskuksen hankinta. ; 2002.
10. Ilmatieteenlaitos. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. Ilmatieteenlaitos, Helsingin yliopisto; 2009.
11. Vapor Boilers Finland Oy. Vapor TTK-Höyrykattilat- tekniset tiedot. [Online].; 2015 [Viitattu 20. 10. 2015]. Saataavissa: http://www.vapor.fi/wp-content/uploads/2014/06/Vapor_TTK_kattilat.pdf.
12. Finlex. Asetus 750/2013. [Online].; 2013 [Viitattu 14. 9. 2015]. Saataavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130750>.

13. Adven Oy. PIPO-asetus. [Online].; 2015 [Viitattu 14. 10. 2015]. Saatavissa: <http://www.polttavamuutos.fi/pipo-asetus/>.
14. Tilastokeskus. Energian hinnat. [Online].; 2015 [Viitattu 20. 10. 2015]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_tie_001_fi.html.
15. Elinkeinoelämän keskusliitto. ek.fi. [Online].; 2014 [Viitattu 21. 8. 2015]. Saatavissa: http://ek.fi/wp-content/uploads/Paastokauppa_9.5.2014.pdf.
16. Sokka L, Koponen K, Keränen JT. Cascading use of wood in Finland – with comparison to selected EU countries. , VTT; 2014.
17. Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta. [Online].; 2015 [Viitattu 9. 11. 2015]. Saatavissa: <http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/11-oljytuotteiden-kuluttajahintaseuranta>.
18. Motiva. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästökertoimet sekä energian hinnat. [Online].; 2015 [Viitattu 9. 11. 2015]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden_lampoarvot_hyotysuhteet_ja_hiilid_ioksidin_ominaispaastokertoimet_seka_energianhinnat_19042010.pdf.
19. Hiltunen, Asko. Teboil. 2015. Sähköpostikeskustelu.
20. Plus500. Oil (CL) CFD. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: <http://www.plus500.com/Instruments/CL?gclid=CKKVl-mjvMgCFeH2cgod0XMJbw>.
21. Hippinen I, Suomi U. Yhteenvedot CO₂-päästöjen laskentaohjeistus ja käytettävät CO₂ päästökertoimet. Motiva; 2012.
22. Juvonen T. Markkinakatsaus. Savon Voima; 2015.
23. Pullinen, Markku. Vapo. 2015. Sähköpostikeskustelu.
24. Tulli. Nestemäisten polttoaineiden verotaulukko. [Online].; 2015 [Viitattu 5. 11. 2015]. Saatavissa: http://www.tulli.fi/fi/yrityksille/verotus/valmisteverotettavat/energia/lisatietoa/nestemaiset_polttoaineet_verotaulukko.pdf.
25. Oasmaa A, Peacocke C. Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids. A guide. Espoo.; VTT; 2010.

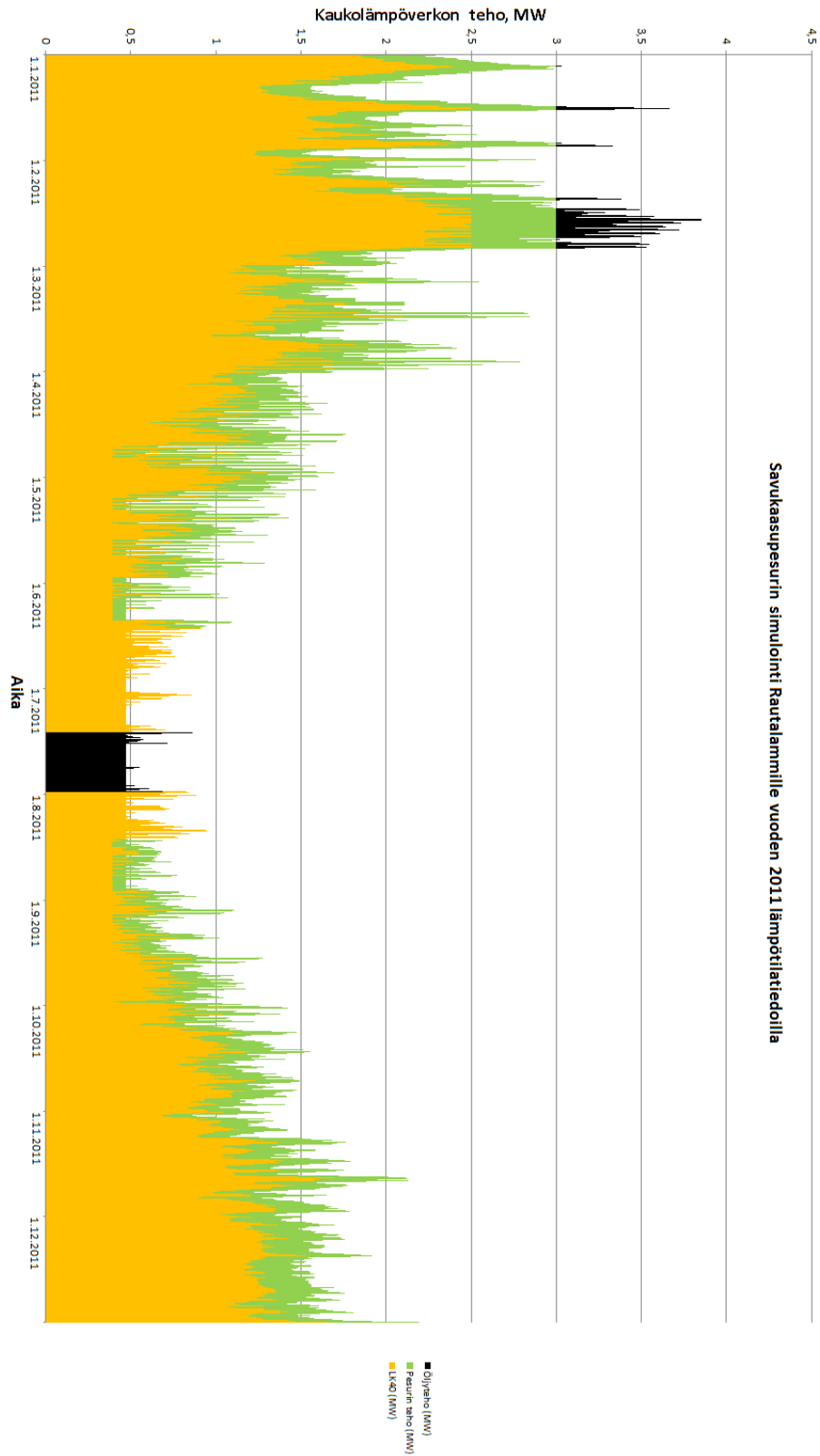
26. Tae-Seung K, Jae-Young K, Kwang-ho K, Soomin L, Donha C, In-Gyu C, et al. The effect of storage duration on bio-oil properties. Seoul: Seoul National University, Department of Forest Science; 2012.
27. Green Fuel Nordic Oy. Kuinka modifioidaan olemassa oleva laitos bioöljylle (RFO) soveltuvaksi.
28. Rantonen, Aki. Käyttöpäällikkö, Savon Voima. 2015. Haastattelu.
29. Lehto J, Oasmaa A, Solantausta Y, Kytö M, Chiaramonti D. Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. Espoo:, VTT Technical research centre of Finland; 2013.
30. Alakangas E. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Vtt; 2000.
31. Arterm. BioJet. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: <http://www.arterm.fi/lammitysratkaisut/jarjestelmakomponentit/biopolttimet/biojet/>.
32. Motiva. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Lämpöpumppu ja ORC-sovellukset. Helsinki; 2014.
33. Marko Nieminen, Calefa Oy. Myyntipäällikkö. 2015. Sähköpostikeskustelu.
34. Motiva. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Ylijäämäenergia-analyysit. Helsinki; 2014.
35. Caligo Industria. Nykyaikainen savukaasupesuri. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf.
36. Ehox Tuote Oy. Kostutus savukaasujen lauhdutusprosessissa. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: http://www.ehox.fi/lauhdutus_kos.htm.
37. Condens heat recovery Oy. Savukaasun puhdistus ja LTO tehostettuna palamisilman kostutuksella. [Online].; 2015 [Viitattu 15. 10. 2015]. Saatavissa: <http://www.condens.fi/fin/kostutus.htm>.
38. Caligo Industria. Caligo CSX HP -savukaasupesurijärjestelmä. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: http://www.caligoindustria.com/files/Caligo_CSXHP_Brochure_FIN_2015v1.pdf?

39. Mauthner F, Weiss W, Spörk-Dur M. Solar heat worldwide. Markets and contribution to the energy supply 2013. IEA, Solar heating & cooling programme; 2015.
40. Pöyry management consulting Oy. Aurinkolämmön liiketoimintamahdollisuudet kaukolämmön yhteydessä Suomessa. Vantaa; 2013.
41. Tahkokorpi M, Hagström M, Vanhanen J. Aurinkolämmön mahdollisuudet kaukolämpöjärjestelmässä. Gaia Consulting Oy; 2011.
42. Sepratec. FINO tasokeräin. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: <http://www.sepratec.fi/kauppa/-p-693.html>.
43. Kylpyhuonemarket. Tyhjiöputkikeräimen toimintaperiaate. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: <http://www.kylpyhuonemarket.fi/Aurinkoenergia/Aurinkopaneelit/Tyhioeputkikeräimen-toimitaperiaate>.
44. Building & Engineering Services Association. Solaer Thermal. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: <http://www.b-es.org/sustainability/sustainable-technology-briefing-sheets/solar-thermal-guidance/>.
45. De Wit J. Heat Storages for CHP Optimisation. Danish Gas Technology Centre; 2007.
46. Kara M, Helynen S, Mattila L, Viinikainen S, Ohlström M, Lahnalampi M. Energia Suomessa, tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3rd ed. Helsinki: VTT; 2004.
47. Tilastokeskus. Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvot. [Online].; 2015 [Viitattu 21. 10. 2015]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_kuv_006_fi.html.
48. NASDAQ OMX. Nasdaq Commodities, market prices. [Online].; 2015 [Viitattu 28. 9. 2015]. Saatavissa: <http://www.nasdaqomx.com/commodities/market-prices>.
49. Juvonen, Toni. Analyttikko, Savon Voima. 2015. Haastattelu.
50. Karhu J. Diplomityö: Kaukolämpöakun koon optimointi ja taloudellinen kannattavuus. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto; 2010.
51. Fortum. Joensuun tiedepuisto. [Online].; 2013 [Viitattu 14. 10. 2015]. Saatavissa:

www.tiedepuisto.fi/file.php?fid=557.

52. Nurminen, Heikki, Jartek Invest Oy. Puhelin- ja sähköpostihaastattelu. 14.9.2015.
53. Holmberg H. Biofuel drying as a concept to improve the energy efficiency of an industrial CHP plant. Helsinki: Helsinki university of technology, Department of mechanical engineering; 2007.
54. Eriksson A. Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and power plants. Uppsala: Swedish University of Agricultural Technology, Department of Energy and Technology; 2011.
55. Yliopisto IS. Puupolttoaineiden laadunhallinta osana hankinnan ohjauksen ja varastojen hallinnan tietojärjestelmiä -LAAVA. [Online].; 2011 [Viitattu 2. 9. 2015]. Saatavissa: <http://mekri.uef.fi/laava/>.
56. Jukka Lahti, HAKLOG Ky. Bioenergia-alan asiantuntija. 2015. Puhelinkeskustelu.
57. Tepponen, Janne. Käyttöpäällikkö, Savon Voima. 2015. Puhelinkeskustelu.
58. Energiavirasto. Syöttötariffien määräytyminen. [Online].; 2015 [Viitattu 9. 11. 2015]. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/2015-Q3+Sy%C3%B6tt%C3%B6tariffin+m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ytyminen+2015-10-01+FI.pdf/c9dceae8-af53-4460-94ba-f346c1ed01d4>.
59. Calefa Oy. CALERI® ENERGIANKIERRÄTYS. [Online].; 2015 [Viitattu 3. 9. 2015]. Saatavissa: <http://calefa.fi/fi/kannattavuuslaskuri/>.
60. Motiva. Lämpöpumput. [Online].; 2015 [Viitattu 2. 9. 2015]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampopumput.

LIITE A: LTO-SAVUKAASUPESURIN SIMULOINTI RAUTALAMMILLE



LIITE

B:

LTO-SAVUKAASUPESURIN

SIMULOINTI

KIURUVEDELLE

